



Vulnérabilité des ressources en eau karstiques en milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Beni Snassen (Maroc oriental). Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes 'SIG'

Asmaa Tayebi

► To cite this version:

Asmaa Tayebi. Vulnérabilité des ressources en eau karstiques en milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Beni Snassen (Maroc oriental). Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes 'SIG'. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2011. Français. <NNT : 2011GRENA031>. <tel-00710157>

HAL Id: tel-00710157

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00710157>

Submitted on 20 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **géographie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Asmaa TAYEBI

Thèse dirigée par « **Dominique GASQUET** » et
codirigée par « **Stéphane JAILLET** » et « **Mohammed
BOUABDELLAH** »

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM** (université de Savoie)
et du **Laboratoire GMHE** (université Mohammed I à Oujda)
dans l'**École Doctorale SISEO** et le **Centre d'Etudes Doctorales
Sciences et Techniques**

**Vulnérabilité des ressources en eaux
karstiques en milieu méditerranéen
semi-aride : le massif des Béni Snassen
(Maroc oriental).**

**Approche pluridisciplinaire et utilisation
des méthodes «SIG»**

Thèse soutenue publiquement le « **16/12/2011** »,
devant le jury composé de :

M. Mohammed BOUABDELLAH

Professeur à l'université Mohammed Premier, Maroc (Co-directeur)

M. Lhoussaine BOUCHAOU

Professeur à l'université Ibn Zohr, Maroc (Rapporteur)

M. Jean-Jacques DELANNOY

Professeur à l'université de Savoie (Examinateur)

M. Alain DEVOS

Maître de conférences à l'université de Reims Champagne-Ardenne
(Rapporteur)

M. Dominique GASQUET

Professeur à l'université de Savoie (Directeur)

M. Stéphane JAILLET

Ingénieur de recherche CNRS (Co-directeur)



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **géographie**

Présentée par

Asmaa TAYEBI

Thèse dirigée par « **Dominique GASQUET** » et
codirigée par « **Stéphane JAILLET** » et « **Mohammed BOUABDELLAH** »

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM et GMHE**
dans l'**École Doctorale SISEO**

**Vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en
milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Béni
Snassen (Maroc oriental).**

Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes «SIG»

REMERCIEMENTS

C'est d'abord à mes directeurs de thèse, messieurs Dominique GASQUET et Stéphane JAILLET, que vont toute ma respectueuse gratitude pour le soutien, l'encadrement et les conseils qu'ils ont toujours su me prodiguer tout au long de ce travail. Ils ont manifesté une grande patience à mon égard et un vif intérêt pour ce travail ponctué par leurs remarques empreintes de toute leurs expériences scientifiques et de leurs parfaites connaissances sur la géologie du Maroc et le karst. Je tiens aussi à remercier le Professeur Mohammed BOUABDELLAH pour avoir accepté de co-encadrer cette thèse et facilité un l'université de Mohammed Premier.

J'exprime aussi mes remerciements au Professeur Jean-Jacques DELANNOY qui était le porteur de ce projet de recherche. Ces orientations lors mon Master I et Master II ont conduit la réalisation de ce travail qui porte aujourd'hui ses fruits. Il m'est agréable aussi de remercier les autres membres du jury : Lhoussaine BOUCHAOU et Alain DEVOS d'avoir accepté de juger ce travail.

Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration de différentes compétences. Mes remerciements s'adressent donc à toutes les personnes impliquées. Je désire donc remercier Jérôme POULENARD pour son encadrement dans la partie pédologique, le Professeur Christophe GAUCHON pour ses conseils concernant la partie anthropique. Pour la création le traitement de base de données SIG je tiens à remercier chaleureusement Françoise ALLIGNOL et Estelle PLOYON. Leur aide a été précieuse pour la réalisation de ce travail. Merci aussi à Stéphanie GALLINO et Marc DZIKOWSKI pour leur aide à la construction des diagrammes de Piper.

La collaboration efficace de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya m'a beaucoup éclairée sur les problèmes de l'eau dans la région orientale et surtout a permis de réaliser des analyses physico-chimiques des eaux. Le financement de ces analyses a constitué un réel soutien à mes recherches. Un très grand merci à monsieur Youssef SADDUG pour son encadrement au laboratoire et à monsieur Mohammed CHANIGUI pour ces conseils en hydrogéologie. Un grand merci également pour l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de la Moulouya, et particulièrement à monsieur Abdellah BOUYADID et son équipe et monsieur Ahmed ROBAAI pour leur collaboration. Qu'ils trouvent ici ma grande reconnaissance.

Je remercie les responsables de la Direction Régionale des Eaux et Forêts de l'Oriental pour leurs conseils scientifiques et la mise en disposition d'un véhicule afin de faciliter les missions de terrain. Un merci particulier à Elmiloud LAABIDATE.

Je remercie également les responsables de la Délégation Régionale du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement qui m'ont permis l'accès aux bases de données bibliographiques et aux photos aériennes.

Je profite de remercier monsieur Taieb BOUMEAZA pour ses conseils et à la mise à disposition de ses travaux scientifiques sur la région orientale. Un grand merci également Mohamed BOUCHEAB, ancien ingénieur à la Délégation Régionale du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement pour son accompagnement sur le terrain à plusieurs reprises.

Je remercie le directeur de cabinet du gouverneur de la province de Berkane monsieur Abdel Alhak ELHASSANI pour sa confiance et son soutien à mes recherches et pour l'aide afin d'obtenir les autorisations administratives pour les missions de terrain.

Un grand merci aux responsables des deux communes Zegzel et Tafouralet pour leur soutien et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Un grand salut à la population locale pour leur accueil, leur gentillesse et leur générosité.

Un merci particulier et chaleureux à mon cousin Abdel Elfattah BOURASS pour son accompagnement sur le terrain, sa patience et sa gentillesse. Cette thèse lui doit beaucoup.

Je salue particulièrement Mme Bénédicte COLLOT qui a revu les imperfections de style et d'orthographe du présent travail et qui a été très présente le long de mes années chambériennes. Merci pour son soutien, son amitié et sa tendresse maternelle.

Je tiens à remercier chaleureusement Marie-Odile SIGG et Rodolphe LEISING pour leur sympathie, leur amitié, leur confiance en moi et leur soutien moral et matériel.

Merci à tous mes amies avec qui j'ai partagé quelques fois mes déboires mais plus souvent mon enthousiasme : Abdel Wahid, Amandine, Benjamin, Bruno, Carole, Eva, Justine, Laine, Leila Noamane, Marie, Melaine, Pierre, Said, Salma, Samira... Qu'ils sachent que leurs encouragement, soutien, présence et confiance m'ont toujours donné de l'énergie pour continuer.

J'ai gardé pour la fin ceux qui me sont les plus chers : ma famille. Je pense tout d'abord à mes parents qui m'ont toujours fait confiance et qui m'ont appris à donner le meilleur de moi même. Un grand merci pour mon père pour son soutien, son appui et son accompagnement sur le terrain. Je pense également à mes sœurs, mes frères, mon beau-frère, et mon mari.

Je dédie ce travail à mes parents et à mon pays, mais aussi à tout ceux qui ont cru en moi.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
PARTIE I : ÉLÉMENTS DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES EN MILIEU MÉDITERRANÉEN SEMI ARIDE »	39
INTRODUCTION PARTIE I	31
CHAPITRE 1 : PARAMÈTRES D'ÉTAT DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES »	39
CHAPITRE 2 : PARAMÈTRES VARIABLES DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES »	109
CONCLUSION PARTIE I	190
PARTIE II : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES	191
INTRODUCTION PARTIE II	193
CHAPITRE 3 : CONSTRUCTION DU SIG : SPATIALISATION ET ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT DANS LA VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU KARSTIQUES	195
CHAPITRE 4 : ANALYSE SPATIALE DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES. TESTS DES FACTEURS DE PONDÉRATION DES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION SELON LA MÉTHODE « PPILK »	235
CHAPITRE 5 : KARST ET TEMPS LONG : UNE RECONSTITUTION PALÉO-GEOGRAPHIQUE DE LA GROTTÉ DU CHAMEAU	255
CHAPITRE 6 : ANALYSE TEMPORELLE (TEMPS COURT) DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES	273
CONCLUSION PARTIE II	297
CONCLUSION GÉNÉRALE	303
BIBLIOGRAPHIE	315
ANNEXES	329
TABLES	365

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Problematique

1.1 Le bassin méditerranéen : une zone caractérisée par une pénurie en eau chronique

Aujourd'hui, le bassin Méditerranéen connaît une surexploitation de la ressource en eau qui le classe parmi les zones les plus affectées par un risque de pénurie (MARGAT, 2008). Alors qu'il représente 7,3 % de la population mondiale, il ne totalise que 3,3 % des ressources renouvelables en eau (DUGOT, 2004). Cela donne une moyenne méditerranéenne deux fois inférieure à la moyenne mondiale, qui est de 7 243 m³ par an et par habitant (DUGOT, 2004).

Les problèmes d'insuffisance relative aux ressources en eau face à la montée des besoins se sont aggravés ces dernières décennies. La pénurie des ressources en eau dans les pays méditerranéens est le reflet d'une conjugaison entre facteurs anthropiques et facteurs environnementaux.

En ce qui concerne les facteurs anthropiques, il est important de souligner que le bassin méditerranéen figure parmi les espaces les plus anciennement peuplés et qu'il se caractérise aujourd'hui par des densités importantes et une forte demande en eau. L'agriculture est le premier secteur consommateur d'eau : 63 % de la demande totale en eau (42 % au Nord et 81 % au Sud et à l'Est) (MARGAT, 2008). L'irrigation est presque partout nécessaire pour assurer des productions agricoles à l'heure où de nombreux pays se sont spécialisés dans l'agriculture exportatrice (Espagne, France, Italie, Grèce, Turquie, Egypte, Tunisie, Maroc, etc.) (MARGAT, 2008). Le bassin méditerranéen est la première destination touristique à l'échelle mondiale (250 millions de touristes nationaux et internationaux) (MARGAT, 2008). Ce tourisme amplifie les demandes en eau potable dans les zones d'accueil et induit des activités de services et de loisirs forte consommatrice d'eau. En outre, l'utilisation de l'eau industrielle est non négligeable à l'échelle de la méditerranée (de 2 à 12 % au sud et à l'est et de 2 à 10 % au nord) (MARGAT, 2008). Le facteur anthropique exerce donc une pression de plus en plus forte sur les ressources en eau.

Les autres facteurs qui conditionnent la pénurie de la ressource en eau sont les données environnementales et notamment le climat. Le bassin méditerranéen est marqué par une forte aridité, particulièrement dans les régions méridionales et orientales.

Le climat méditerranéen comporte plusieurs contraintes dans la disponibilité de la ressource en eau.

- **la première contrainte** du climat méditerranéen est liée à des précipitations marquées par une forte saisonnalité ;
- **la deuxième contrainte** est une forte intensité pluviométrique (les pluies méditerranéennes se font sous forme d'averses violentes) ;
- **la troisième contrainte** est l'irrégularité interannuelle des bilans pluviométriques.

C'est la conjugaison entre les données environnementales et les données anthropiques qui fragilisent les ressources naturelles et notamment les ressources en eau.

De profondes disparités existent du point de vue de la disponibilité de la ressource en eau. Selon DUGOT (2004), il existe trois groupes de pays méditerranéens par rapport à la disponibilité de la ressource en eau. Cette typologie prend en compte la situation actuelle des pays : population, taux

de croissance, besoins économiques actuels et prévisibles, niveau de développement des pays, niveau qui conditionne leurs potentialités financières et leurs accessibilités à la technique.

- **Groupe 1** : ce groupe est composé essentiellement des pays de la rive nord de la méditerranée dont la ressource est abondante (France, Italie, Grèce, Slovaquie, Croatie et Albanie) ;
- **Groupe 2** : dans ce groupe les ressources ne sont pas négligeables. On y trouve : Turquie, Espagne, Chypre, Syrie, Liban, Maroc ;
- **Groupe 3** : on touche là aux pays dans lesquels la situation est d'ores et déjà inquiétante, on trouve dans ce groupe Malte, Israël, les territoires palestiniens, l'Algérie, la Tunisie, l'Égypte et la Libye.

Ce classement croise d'une part la quantité des ressources en eau disponibles et le niveau de développement économique et de l'autre part la croissance démographique de chaque pays.

Les problèmes de la pénurie en eau risquent de s'intensifier encore et de s'étendre à l'ensemble du bassin méditerranéen sous l'effet prévisible du changement du climat. Les conséquences des modifications climatiques se traduiront probablement par une réduction des précipitations, par une aggravation des irrégularités de répartition des ressources en eau dans le temps et dans l'espace (irrégularités qui caractérisent la région) et par une multiplication des phénomènes de sécheresse.

Les pays méditerranéens sont confrontés (et vont l'être encore plus dans les années à venir) à l'enjeu majeur d'assurer leur croissance économique et la satisfaction des besoins vitaux de leurs populations avec des ressources en eau réduites et pour certains déjà insuffisantes.

En effet, la Méditerranée est pauvre en eau. Les pays du Sud ne sont dotés que de 13% du volume total des ressources méditerranéennes en eau estimé à un milliard de m³ par an, mais dont la moitié, seulement, est exploitable (MARGAT, 2008). **On mesure encore mieux l'inégalité des potentialités en eau entre Nord et Sud, quand on prend en compte leurs populations respectives et futures.**

La consommation en eau (c'est-à-dire la somme des prélèvements sur les ressources, y compris les pertes lors du transport et de l'usage et des productions non conventionnelles : dessalement, réutilisation des eaux usées...), a doublé dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle pour atteindre, en 2000, 290 km³/an pour l'ensemble des pays riverains (MARGAT, 2008).

Les ressources en eau du bassin méditerranéen sont non seulement limitées, mais elles sont également réparties géographiquement de façon très inégale (MARGAT, 2002). En effet, la France, l'Italie et la Turquie concentrent les deux tiers de ces ressources sur une surface correspondant seulement à 1/5 du bassin. Le reste des pays méditerranéens ne dispose que du tiers restant (MARGAT, 2008).

La pénurie en eau est particulièrement aiguë sur les rives orientales et méridionales du Bassin méditerranéen (MARGAT, 2004). En 2000, les ressources moyennes en eau exploitable par habitant confirment cette inégalité de répartition : 2 254 m³/habitant/an au Nord, 1 339 m³/habitant/an à l'Est et seulement 572 m³/habitant/an au Sud du bassin (MARGAT, 2008).

Dans les zones de la rive sud de la méditerranée, l'eau constitue un des problèmes majeurs,

dans la mesure où elle représente un facteur clé du développement durable. En outre, ces zones présentent des ressources en eau limitées au regard, d'une part, de l'accroissement des demandes lié à la démographie, à l'amélioration des conditions de vie et au développement socio-économique et, d'autre part, à l'accentuation de la sécheresse ces dernières décennies. La gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines et superficielles est donc actuellement une urgence pour assurer la pérennité des ressources.

Les aquifères les plus répandus dans le Bassin méditerranéen sont de trois types principaux :

1. les aquifères carbonatés karstiques constituent de véritables « châteaux d'eau » pour les rivières pérennes que des sources, souvent abondantes, entretiennent ; ils sont plus ou moins étendus (figure 1) ;
2. les aquifères alluviaux, localisés dans les vallées et les deltas des principaux fleuves ;
3. Les aquifères de formations sédimentaires principalement détritiques.

Ce travail est focalisé sur les ressources en eau karstiques. Le choix des massifs karstiques se justifie par le trait original qui constituent ces paysages dans l'ensemble méditerranéen et, surtout, par le rôle majeur qu'ils jouent sur le régime des eaux de nombreuses régions orientales et méridionales ; les pays concernés sont le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, Israël, la Palestine, la Jordanie, le Liban et la Syrie (NICOD, 2009).

Cette étude concerne le massif des Béni Snassen situé dans la région orientale du Maroc. Ce dernier constitue un site clé pour un questionnement plus large portant sur l'ensemble des situations similaires en rive sud de la méditerranée.

Avant d'aborder les ressources en eau dans le massif des Béni Snassen, il est important de définir la situation actuelle des ressources en eau dans son environnement, d'où la nécessité de présenter les ressources en eau du Maroc oriental.

1.2. La région orientale du Maroc : Situation actuelle des ressources en eau

La question de l'eau se pose dans la région orientale du Maroc de manière aiguë (comme d'autres régions du Maroc) et s'impose comme un facteur essentiel pour le développement actuel et futur. Cette région souffre d'une double problématique en matière de ressources en eau tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif.

Problématique quantitative des ressources en eau au Maroc oriental

La région orientale du Maroc s'inscrit entièrement dans un cadre bioclimatique aride à semi-aride d'un côté, et elle appartient à des bassins hydrologiques non atlantiques d'un autre côté. Ces caractéristiques influencent les apports hydriques, les précipitations étant très faibles. Les valeurs dépassent rarement les 400 mm/an. Pour les zones centrales, les précipitations enregistrent environ 100 mm/an. Pour faire face à cette insuffisance quantitative des ressources hydriques, le bassin versant de la Moulouya a été équipé depuis la fin des années 50 par des ouvrages de la gestion des eaux (cf. Annexe1).

Malgré l'existence de nombreux ouvrages hydrauliques (barrage Mohamed V, barrage de Mechraa Hammadi, station de pompage de Moulay Ali) les ressources sont limitées pour assurer

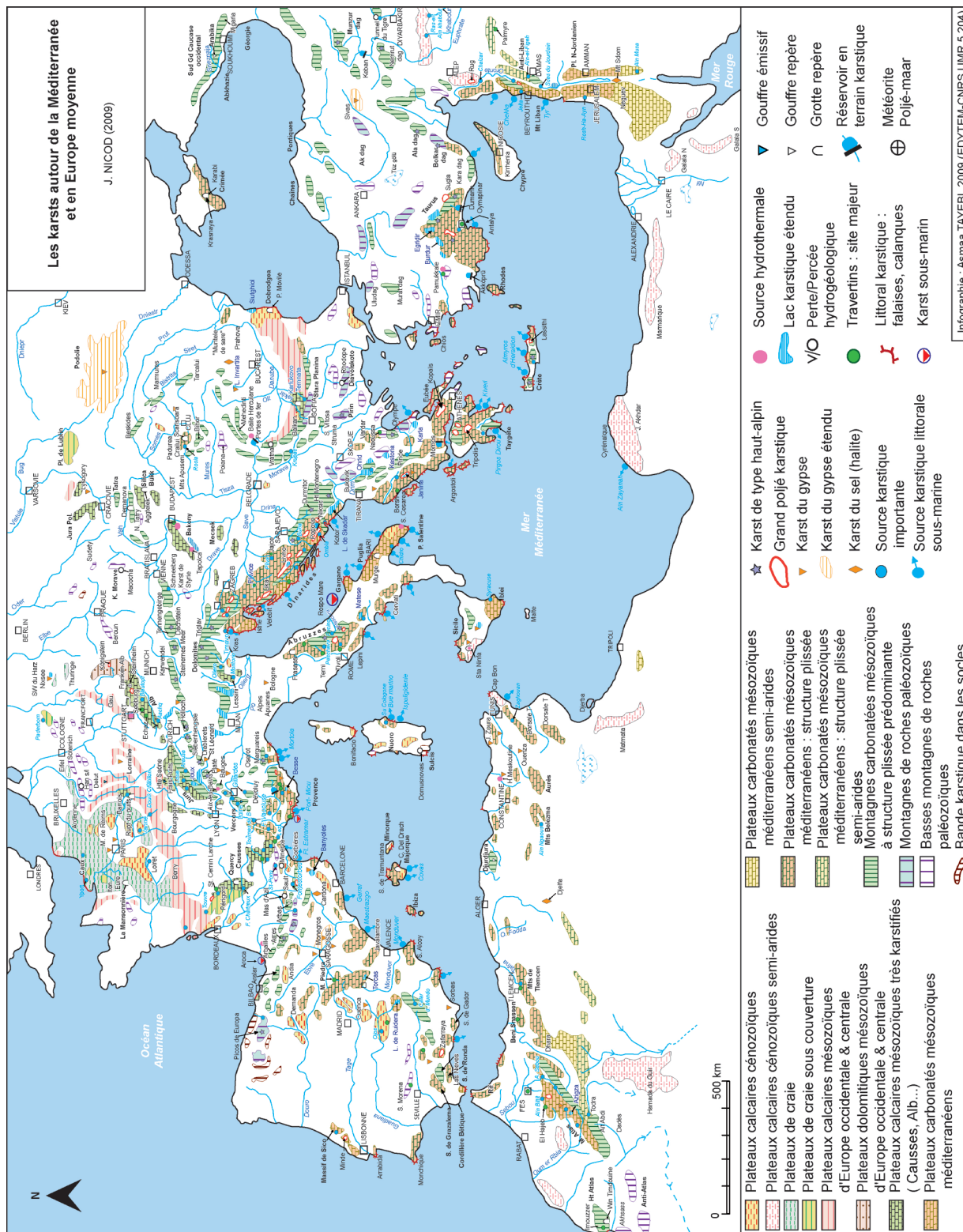


Figure 1 : karsts autour de la méditerranée et en Europe moyenne d'après NICOD (2009).

sans contrainte un développement économique et social durable. Les ressources en eau mobilisées représentent 1.122 Mm³/an, alors que la demande est de 1.222 Mm³/an (95% de la consommation de l'eau mobilisée se fait principalement par l'agriculture). Ce bilan déficitaire de 100 Mm³/an place le bassin de la Moulouya dans une situation de pénurie d'eau (SNOUSSI, 2000). Selon la Direction de la Recherche et la Planification de l'Eau (DRPE), les ressources en eau disponibles en 2020 dans le bassin versant de la Moulouya, ne pourraient pas satisfaire la demande en eau. A l'horizon de 2020, la région enregistrera un déficit hydrique de – 176 Mm³/an (cf. Annexe 2).

Problématique qualitative des ressources en eau au Maroc oriental

A l'échelle du bassin versant de la Moulouya, un suivi de la qualité des eaux est assuré par un réseau de 91 stations de mesures (figure 2).

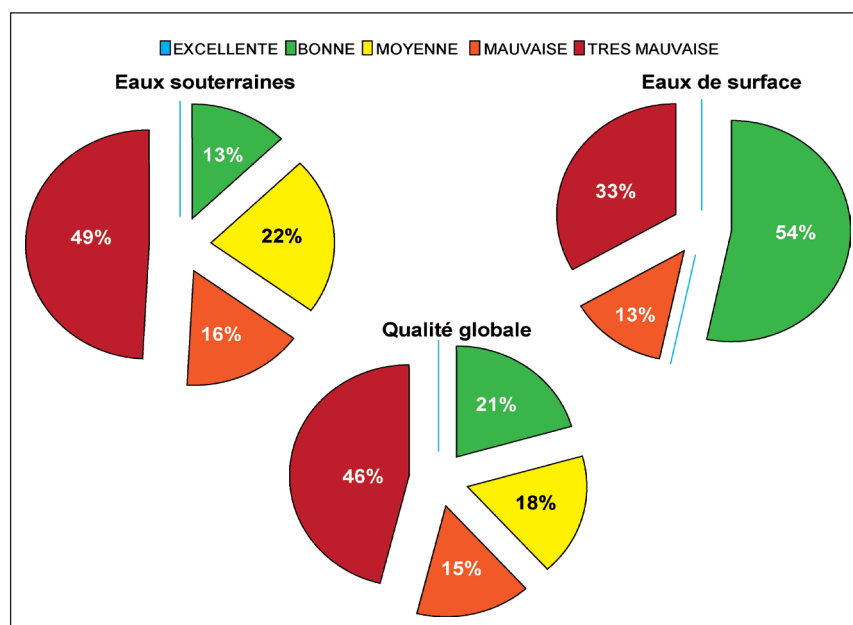
Ces stations de mesures se divisent en deux catégories :

- (i) **eaux souterraines** qui englobent les nappes suivantes : Angad (17 stations), Kert, Gareb et Bouareg (15 stations), Guerciffas (14 stations), Aïn Béni Mathar (12 stations), Haute Moulouya (2 stations), Moyenne Moulouya (1 station (cf. Annexe 3) ;
- (ii) **eaux de surfaces** dans lesquelles on distingue les stations primaires (7 stations), les stations secondaires (14 stations) et les retenues des barrages (3 stations) (cf. Annexe 4).

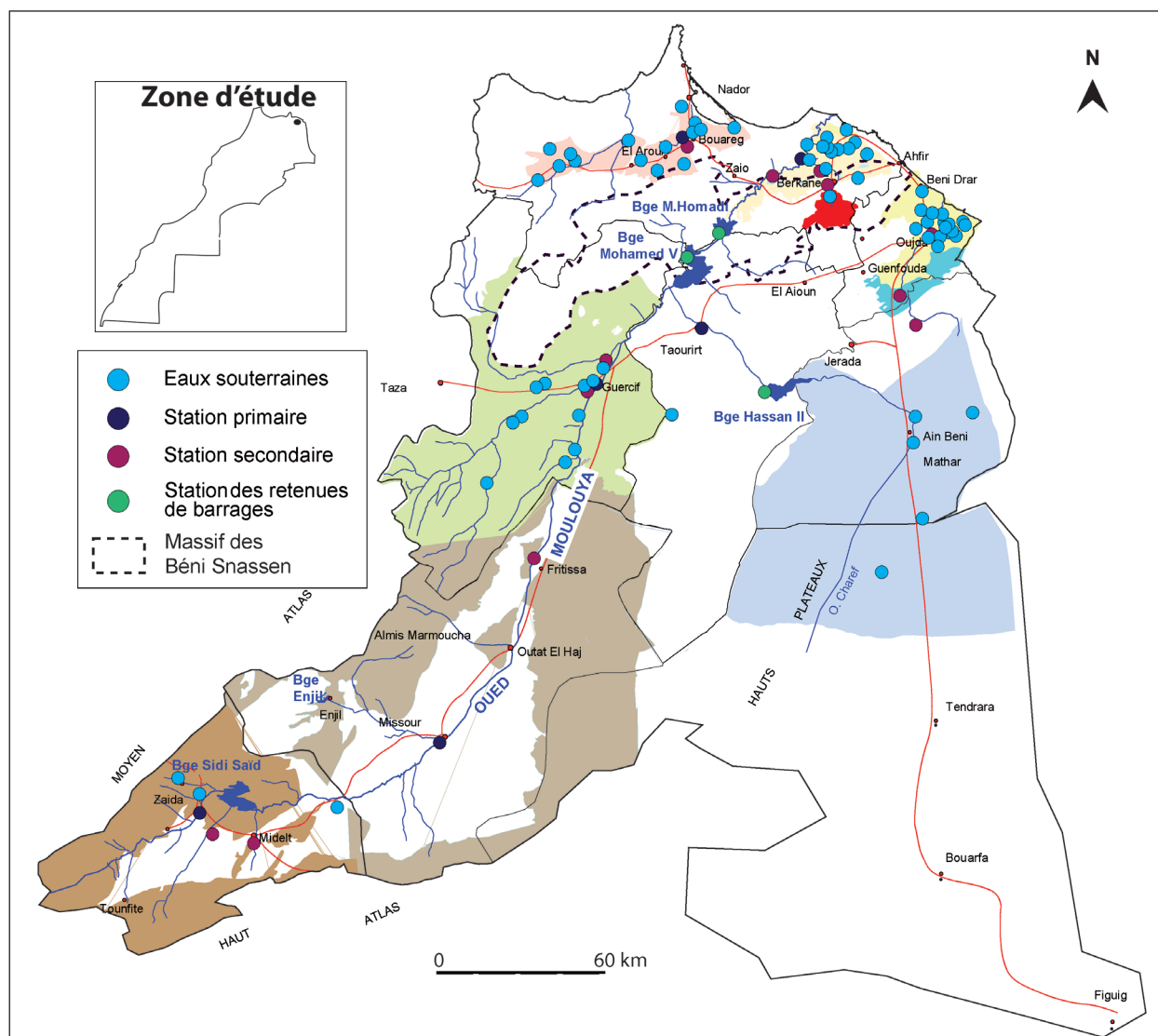
Qualité globale des eaux du bassin versant de la Moulouya

La figure 3 met en évidence la forte dégradation des eaux du bassin versant de la Moulouya : 46% des eaux globales du BV de la Moulouya sont de très mauvaise qualité ; Il est à noter que 49% des eaux souterraines et 33% des eaux de surface étant de très mauvaise qualité. 21% des eaux de l'ensemble du bassin versant sont de bonne qualité, 18% sont de moyenne qualité et 15% sont de mauvaise qualité.

Figure 3 : Qualité globale des eaux du bassin versant de la Moulouya.



Source : (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement, 2008)



Les nappes souterraines sont présentées en couleurs différentes

Source : (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement, 2008)

Figure 2 : Réseau de surveillance de la qualité des eaux dans le bassin versant de la Moulouya.

A cette dégradation remarquable et progressive des eaux s'ajoute une forte demande en eau de différents secteurs : l'irrigation à cause de l'amplification des périodes de sécheresse ; l'accroissement rapide des populations, notamment en milieu urbain ; le développement industriel ; les projets de développement touristique, notamment la grande station balnéaire de Saïdia sur la rive sud méditerranéenne (au nord de Berkane).

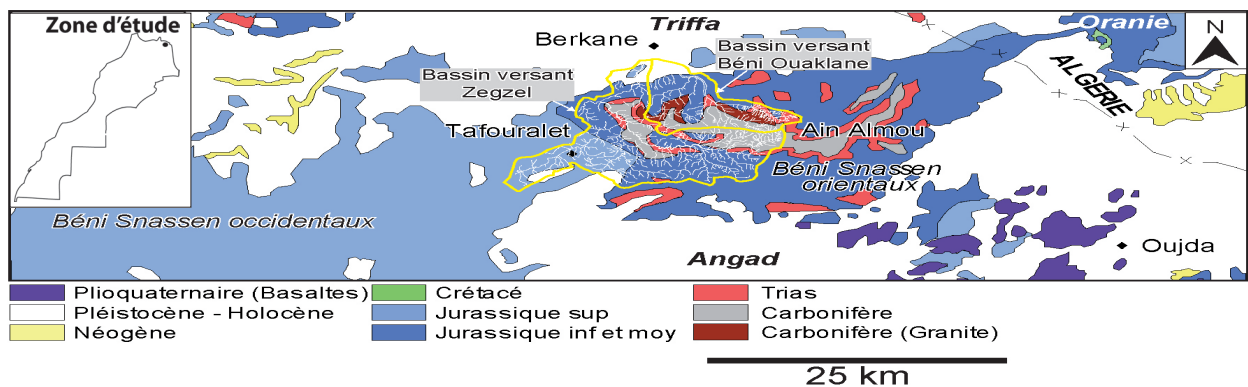
Le massif des Béni Snassen constitue cependant un « château d'eau » de la région orientale qui sera probablement exploité de plus en plus dans le futur pour faire face au déficit hydrique que la région affronte et qu'elle affrontera plus dans le futur.

1.3. Le massif des Béni Snassen « château d'eau » en milieu méditerranéen semi-aride

Pour illustrer la complexité de l'évaluation de vulnérabilité des eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride, nous nous focaliserons sur le *massif des Béni Snassen* (Maroc oriental). Ce massif a été choisi car il permet d'aborder l'ensemble des problématiques liées à la vulnérabilité des ressources en eau sur la rive sud du bassin méditerranéen.

Situé dans la partie nord-est du Maroc aux confins de la frontière algéro-marocaine (figure 4), le massif des Beni Snassen, constitue un exemple type de paysage méditerranéen à climat semi-aride où les aquifères karstiques constituent les principaux réservoirs d'approvisionnement quotidien en eau pour la population locale. Aussi, la protection de ces ressources hydriques y revêt un intérêt vital.

Géographiquement, le massif des Beni Snassen est limité au nord par la plaine des Triffa qui le sépare de la côte méditerranéenne, au sud par la plaine des Angad, à l'est du col du Garbous, et à l'ouest par l'Oued Moulouya. Le massif se prolonge en Oranie occidentale (Algérie) par les monts des Felloussène et les Traras.



Source : (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie, 1982)

Figure 4 : Carte de localisation de la zone d'étude (bassins versants de Zegzel et de Béni Ouaklane)

Ce massif possède un potentiel hydrologique relativement important. Il se situe dans un environnement reflétant l'image d'une moyenne montagne de la rive sud méditerranéenne : zone aride, proximité de villes possédant des problèmes d'alimentation en eau potable et projet de développement de l'irrigation et touristique.

2. Concepts

Pour mener à bien cette étude, il est nécessaire de définir avec exactitude le terme de *risque* à la dégradation qualitative et quantitative des eaux karstiques, en abordant sa composite : aléa/vulnérabilité (LEONE et al., 2005). L'étude de la vulnérabilité des ressources en eau ne doit pas se concentrer sur le système karstique, mais intègre également d'autres composantes l'aléa mais aussi la *vulnérabilité* du milieu.

2.1. Définition de l'aléa des eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride

Dans le cadre de notre approche, l'aléa des eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride désigne la probabilité d'occurrence **(i)** d'une *pollution en surface du bassin d'alimentation karstique* transférée jusqu'à l'exutoire ; la pollution correspond à tout contaminant susceptible d'accéder dans la zone interne du karst ainsi que tous les phénomènes non nocifs pour la santé humaine mais qui ont un impact sur la qualité de l'eau comme la turbidité (HOFFMANN, 2000), **(ii)** d'une *sécheresse chronique des sources* : pendant les longues périodes de sécheresse estivales ou interannuelles, les sources sont alimentées, uniquement, par les aquifères karstiques, le prolongement de phase de *tariissement* aboutit à la sécheresse de certaines sources. Cette sécheresse dure jusqu'à l'alimentation des aquifères par des périodes pluvieuses. Le terme « sécheresse » mis en avant est relatif à des phénomènes différents mais complémentaires : il s'applique d'une part, à l'état absolu de la ressource en eau, lié à une baisse de la pluviométrie et à une augmentation de la température, et d'autre part, à l'état relatif d'inadéquation des quantités disponibles avec les besoins (RIAUX et al., 2009).

Le terme de risque de dégradation des eaux karstiques, que nous employons n'est pas synonyme de la toxicité et de la pollution chimique ou minérale. Ce terme est considéré comme toute perturbation qualitative « turbidité » ou quantitative « sécheresse » des eaux karstiques.

Le fonctionnement et l'importance du système karstique, modifient l'impact de ces aléas : le système noyé à une « résilience » plus importante que le système non noyé ; un système karstique ayant une résilience est celui qui a la capacité à éliminer les impacts et à atteindre un fonctionnement normal (REGHEZZA, 2005).

Dans cette réflexion, l'étude de l'aléa est basée sur une analyse géographique (spatiale et temporelle). L'objectif est donc de traiter les facteurs intrinsèques à la dégradation des eaux karstiques.

La plupart des travaux réalisés sur la qualité des eaux karstiques se basent sur les analyses effectuées à l'exutoire afin de définir les types de polluants et de déterminer, ensuite les facteurs intervenant dans la pollution des eaux.

Ce présent travail utilise les analyses physico-chimiques des eaux karstiques pour confirmer leur qualité chimique acceptable. En revanche, pendant les périodes pluvieuses, généralement automnales, qui tombent sur des sols secs et pâturés, après de longues périodes sèches, les eaux des sources sont turbides. Les campagnes d'échantillonnage ont témoigné de la sécheresse de certaines sources, par conséquent le prélèvement de ces sources n'a pas pu être réalisé à chaque campagne d'échantillonnage.

2.2 Définition de La vulnérabilité des eaux karstiques

Définition générale de la vulnérabilité

Le mot **vulnérabilité** vient du latin *vulnerabilis*, issu de *vulnerare*, qui signifie blesser et de *vulnus*, signifie blessure. La vulnérabilité est le caractère de ce qui est vulnérable, c'est-à-dire de ce qui est sensible, fragile, défectueux, et à la merci de la moindre atteinte, blessure, attaque.

Mais elle exprime aussi la capacité d'une personne ou d'un bien de la présence d'un danger donné (REGHEZZA, 2005).

La vulnérabilité est passée progressivement d'un langage courant à un langage plus scientifique, mais comporte aujourd'hui tellement d'usages que la notion devient parfois confuse.

L'approche analytique de la vulnérabilité vise à identifier les **enjeux**, soit les éléments vulnérables, et à évaluer les **pertes** de ces éléments après un ou plusieurs événements catastrophiques. Les enjeux sont les personnes, les biens, milieu naturel susceptible de connaître des dommages, etc. Cette approche classique consiste à établir une évaluation pour chaque enjeu soumis à un aléa (facteurs de vulnérabilité) (LEONE *et al.*, 2005).

La vulnérabilité n'est pas la somme des dommages. Elle est appréhendée à partir d'un ensemble de facteurs qui interagissent sur la capacité de réponse d'un individu, un groupe ou un milieu.

Le système de vulnérabilités se compose de facteurs de vulnérabilité et d'éléments vulnérables (PROVITOLO, 2007). Les facteurs de vulnérabilité intègrent l'analyse des facteurs directs et indirects intervenants dans la vulnérabilité. L'interaction spatio-temporelle des éléments vulnérables, qui s'exprime à l'occasion d'un ou plusieurs événements plus au moins visible « aléa », donne la possibilité de subir des dommages et des pertes « vulnérabilité » (figure 5).

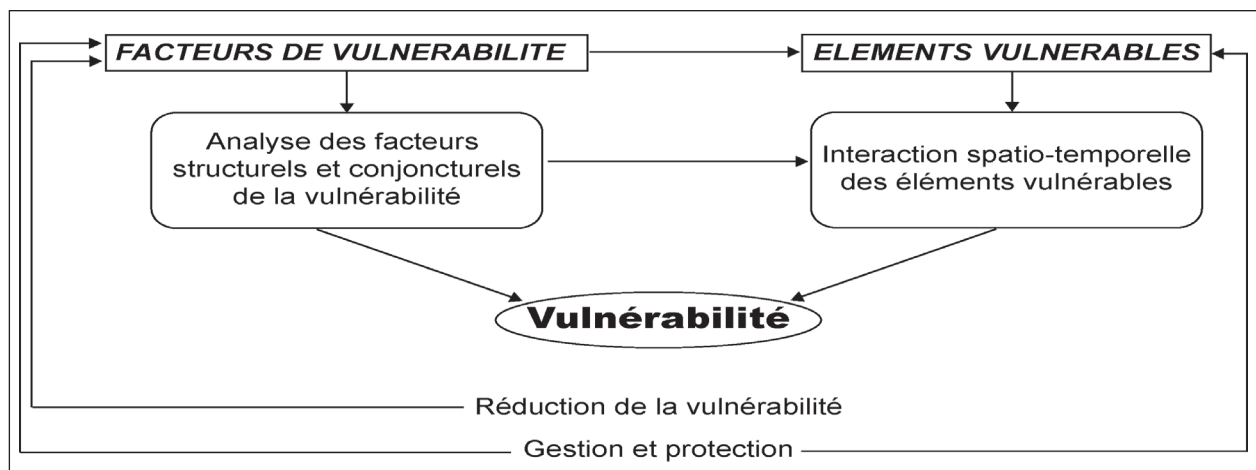


Figure 5 : Approche systémique de la vulnérabilité.

Les principaux objectifs de la réduction de la vulnérabilité sont de modifier les facteurs qui amplifient la vulnérabilité et de rendre les éléments vulnérables durables. Ceci est assuré par la mise en place d'une gestion et une protection durable à la fois des facteurs de vulnérabilité et des éléments vulnérables.

Dans cette approche, l'expression de la vulnérabilité traduit la fragilité d'un système dans son ensemble face aux risques (LEDoux *et al.*, 1999). Donc pour mieux appréhender la vulnérabilité, le travail méthodologique nécessite l'analyser les nombreux paramètres des systèmes complexes pour discerner les différents facteurs intervenants dans la vulnérabilité. Cette analyse permet **la mise en scène de la vulnérabilité**.

L'étude de la vulnérabilité est d'abord liée aux structures internes du système et à leurs degrés d'importance. Elle est également liée aux influences externes. D'autres causes influencent le degré de vulnérabilité, moins visibles mais bien pointées et apparaissent liées aux politiques mises en

œuvres dans la gestion d'un espace, territoire et ressources naturelles. C'est autour de ces aspects que se concentre la réflexion touchant aux questions de la vulnérabilité des eaux karstiques.

Toute étude de la vulnérabilité doit donc s'interroger sur ses objectifs : que protéger ? Contre quoi et à quel prix ?

La vulnérabilité dans le domaine de l'hydrogéologie

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par MARGAT dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse (CUCCHI, 2007; DOERFLIGER *et al.*, 1996, 1998; GOGU *et al.*, 1998a, 1998b, 1998c; JEANNIN *et al.*, 2001; KAVOURI *et al.*, 2011; LALLEMAND-BARRES, 1994; LALLEMAND-BARRES *et al.*, 1989; PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000; PLAGNES *et al.*, 2006; VIAS *et al.*, 2006). Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface.

Pour les hydrogéologues, la vulnérabilité des eaux est liée à la notion de contamination. Il y a contamination lorsqu'une activité humaine ou un phénomène naturel induisent une perturbation de la composition naturelle des eaux souterraines qui limite ainsi leur usage où provoquent des risques pour la santé. La vulnérabilité permet alors d'évaluer la faiblesse des protections naturelles de la ressource en eau.

Dans la littérature, on différencie deux types de vulnérabilité :

- la vulnérabilité **intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution.
- la vulnérabilité **spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Pour la présente étude, qui a pour objet d'étudier la vulnérabilité des ressources en eau karstiques en milieu méditerranéen semi-aride, la définition suivante est adoptée : La vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel et anthropique (fracturation et karstification importantes, sécheresse, averses violentes, dessiccation du sol, déboisement...) sur des enjeux (la cible qui ne doit pas être atteinte : sécheresse et turbidité des ressources en eau karstiques). Autrement dit, La notion de la vulnérabilité repose donc sur l'idée que les conditions naturelles et anthropiques, posées dès impluvium, procurent un degré variable de protection vis-à-vis de l'infiltration des eaux de surface et la recharge des aquifères karstiques.

La vulnérabilité des eaux karstiques, est donc la tendance à favoriser la dégradation qualitative et quantitative des eaux. Elle résulte de la conséquence de multiples facteurs d'ordre géologique géomorphologique, climatique, bio-pédologique et anthropique. On peut parler ici des « **facteurs déclenchants** »

La distinction des deux types de vulnérabilité (intrinsèque et spécifique) est nécessaire car elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariable dans le temps (à notre échelle de travail) : géologie, géomorphologie

et couverture bio-pédologique. Alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux impacts éventuels) : averses, sécheresse, défrichements, érosion, déprise agricole.... est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

La résilience des aquifères karstiques est considérée à travers leur **charge environnementale** à supporter certaines concentrations (physiques et anthropiques : infiltration des matières en suspension, des niveaux de sécheresse saisonnière) sans effets significatifs sur sa nature et son fonctionnement. Le karst ayant la possibilité de renouveler rapidement son stock d'eau et d'atteindre ainsi son fonctionnement normal par (i) l'élimination de la matière en suspension (par le dépôt ou par l'effet chasse d'eau) ; (ii) la recharge suffisante pour assurer un écoulement permanent des sources.

Certains facteurs intrinsèques de l'aquifère karstique peuvent intervenir sur la qualité des eaux par l'atténuation voire la suppression de l'aléa.

Dans le cadre de ce travail, le risque à la dégradation des eaux souterraines karstiques peut être défini comme « *la probabilité d'occurrence d'une contamination de la ressource à un niveau inacceptable (turbidité) ou au stress hydrique des sources (sécheresse)* » le risque n'est donc pas la catastrophe mais la potentialité voire la probabilité de l'accident. Ce risque résulte de la conjonction entre les aléas et les vulnérabilités.

En amont de notre réflexion, nous posons la question suivante :

Comment répondre à une problématique qui confronte une double entrée : une entrée environnementale et autre anthropique ?

Nos recherches reposent sur une approche globale de la question de l'eau croisant les données du milieu et les pratiques anthropiques. Cette approche qui vise la préservation des ressources karstiques, nécessite d'étudier à la fois les données environnementales et les impacts anthropiques. Ceci nécessite de mettre en place une approche interdisciplinaire.

2.3 Définition de l'infiltration et de la recharge

La **définition de l'infiltration** est variable selon le domaine de son application. D'un point de vue hydrogéologique, l'infiltration est définie comme le transit des eaux météoriques à travers les interstices du sol, dans la zone saturée ou directement dans un aquifère par gravité (DUCHAUFOR, 2001). Du point de vue du cycle hydrologique, l'infiltration correspond à la fraction des eaux météorologiques qui n'ont pas été évapotranspirées, qui ne ruissellent pas en surface et qui alimentent les écoulements souterrains (MUSY *et al.*, 2004).

Dans la présente étude, nous étudions les infiltrations efficaces c'est-à-dire la quantité d'eau infiltrée depuis la surface, qui traverse la zone non saturée et parvient effectivement à la zone saturée. C'est le flux d'infiltration qui traverse la surface libre d'une nappe (GILBERT *et al.*, 1977). L'évaluation de ce paramètre est basée sur l'estimation du degré de perméabilité, la protection naturelle et la capacité de résilience du système. Sur l'unité « impluvium » nous allons donc réaliser une étude spatiale de l'infiltration de surface, en supposant l'existence d'une disparité dans les modalités et la répartition spatiale de l'infiltration.

Pourquoi l'infiltration n'est-elle pas uniforme alors que l'impluvium est une unité ? Pourquoi existe-t-il différents types d'infiltrations ? La disparité de la répartition spatiale de l'infiltration influence-t-elle le degré de vulnérabilité des eaux souterraines ?

Selon CASTANY *et al* (1977) la **définition de la recharge** est le processus par lequel la zone saturée d'un aquifère reçoit un apport extérieur, soit directement dans la formation elle-même, soit indirectement par l'intermédiaire d'une autre formation.

3. Objectifs de la thèse

Ce travail de recherche a pour objet de préciser les ressources hydrogéologiques du massif des Béni snassen et de définir leurs vulnérabilités compte tenu du fonctionnement karstique du drainage souterrain. Le karst des Béni Snassen présente un faible degré de filtration ce qui suppose de préconiser dès l'impluvium (zone d'infiltration) les conditions et pratiques minimisant les dégradations physico-chimiques des eaux souterraines. Cette recherche repose sur une approche globale de la question de l'eau croisant les données du milieu et les pratiques anthropiques. Cette approche qui vise la préservation des ressources karstiques, nécessite d'étudier à la fois les données environnementales et les impacts anthropiques.

La prise en compte de cette vulnérabilité est un préalable incontournable pour la mise en place de mesures de protection et de préservation afin d'assurer une gestion et une exploitation durables de la ressource en eau. Ceci nécessite de croiser l'approche environnementale et l'approche territoriale. C'est pourquoi le travail est centré sur deux entrées :

- (i) l'entrée karstique qui permet de combiner le contexte géologique, l'évolution géomorphologique et les données environnementales (bio-pédologique et climatique) ;
- (ii) l'entrée anthropique qui pose les usages passés et actuels et permet de prendre en compte les modes de réponse (en termes d'aménagement, de protection) pour préserver la qualité de la ressource en eau.

Ce travail permet donc de développer une modélisation spatiale et temporelle par le SIG de la vulnérabilité des eaux karstiques. Les cartes obtenues serviront de base de données qui sera utilisée ensuite comme un outil de l'aide à la décision pour mener une gestion, une protection et une préservation durables de la ressource en eau.

Pour mener à bien ces objectifs, le travail se focalisera sur les différents paramètres permettant d'évaluer la vulnérabilité des aquifères karstiques de ce massif ainsi que l'importance de leur réserve. Ces paramètres sont d'ordre géologique et litho-structurale, géomorphologique, climatique et environnemental (sol, végétation). Concernant ce dernier paramètre, il importe de prendre en compte les pratiques anthropiques qui peuvent dégrader (activités agro-pastorales de montagne) ou renforcer (forêt, terrasses agricoles) le caractère régulateur du système. Le rôle des pratiques anthropiques sera évalué dans ce mémoire.

4. Méthodologie utilisée

Pour répondre à la problématique de l'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau karstique en milieu méditerranéen, La méthodologie de travail préconisée s'appuie sur trois grandes étapes :

4.1. Acquisition des données

L'acquisition des données est basée sur :

- (i) **les données de la bibliographie** : il s'agit principalement de travaux universitaires [thèses, articles] et de rapports administratifs des acteurs de la gestion de la ressource en eau [Agence Hydraulique du Bassin de la Moulouya, Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification, Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de la Moulouya, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie, Haut Commissariat au Plan, Direction de la Statistique, communes de Zegzel et Tafouralet, etc.] ;
- (ii) **les travaux de terrain** : ils englobent plusieurs thématiques : inventaire de toutes les sources rencontrées dans le terrain de recherche, échantillonnage saisonnier des principales sources, réalisation d'une carte géomorphologique, échantillonnage de différents sols afin de mesurer le coefficient de perméabilité de chaque type de sol, entretiens avec les acteurs de l'eau ;
- (iii) **les travaux de laboratoire** : ils ont pour but de compléter les travaux réalisés sur le terrain. Ils comprennent les tâches suivantes : analyses physico-chimiques des eaux de sources échantillonnées, les analyses ont été effectuées à l'Agence Hydraulique du Bassin de la Moulouya à Oujda, analyses de coefficient de perméabilité du sol (analyses réalisées au laboratoire Environnements Dynamiques et Territoire de Montagne - EDYTEM), création d'une base de données regroupant des informations climatiques, socio-économiques, etc. digitalisation des cartes topographiques, géologiques, carte de végétations, carte pédologique, etc. traitement des photos aériennes afin de cartographier l'occupation de sol, création d'un système d'information géographique (SIG).

4.2. L'approche systémique appliquée aux traitements des données

L'objectif de nos recherches indique et impose une méthode qui confronte les facteurs environnementaux et anthropiques. Cela veut donc dire combiner des sciences de la nature d'un côté, et des disciplines des sciences de l'homme et de la société de l'autre. Il s'agit de ce fait, de construire une problématique interdisciplinaire centrée sur cette association.

La **systémique** est un outil indispensable pour la réalisation de ce travail. Elle est toujours mise en avant comme l'outil privilégié de l'analyse interdisciplinaire. C'est un outil qui repose sur l'idée de rendre compte de la complexité des composants du système. Elle a, également, une grande souplesse pour raccorder des données de provenances et de natures diverses (DE JOUVENEL, 1999).

Pour mener à bien cette étude nous avons posé les questions suivantes auxquelles nous tenterons de répondre :

Quelle est la capacité de la systémique à accompagner et à formaliser la double interface de notre problématique (environnement / actions anthropiques) ?

L'approche systémique est « **une unité composée de sous-systèmes** » généralement issus de

différentes disciplines. Cette approche permet de rassembler et d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action (ROSNAY, 1975). Elle permet, également, de mettre en scène les différents facteurs internes et externes qui influencent d'une manière directe ou indirecte la problématique posée.

La deuxième question posée est celle de savoir *jusqu'à quel point la systémique peut aider à formaliser les rapports entre disciplines ?* Autrement dit *est-ce la systémique est un guide rigoureux dans la confrontation entre disciplines ?*

Selon ROSNAY (1975) un système peut être défini comme étant « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but* ». L'approche systémique englobe donc la totalité des éléments du système étudié et s'attache à leurs interactions et interdépendances. Ce n'est pas la somme des éléments qui fait un système mais les interactions entre ces éléments « *sous-systèmes* ». Ces sous-systèmes peuvent être de provenance interdisciplinaire. Donc le système est « *une unité identifiable dans un environnement donné et possédant des relations avec cet environnement, de telle sorte qu'elle possède une certaine autonomie* » (DELANNOY, 1997).

La troisième question est la suivante : *quelle est la capacité de l'approche systémique à appréhender l'évolution temporelle d'un système ?*

L'évolution du système dépend de son état à un instant « t ». L'évolution d'un système tourne autour de deux concepts (i) conservation/régulation : le système fonctionne, échange avec son environnement avec la maintenance de son fonctionnement et (ii) évolution/changement : le système évolue et change en fonction des flux externes qui le traversent (JAILLET, 2005). Donc le système est « *une unité subissant des modifications dans le temps tout en conservant une certaine permanence* » (DELANNOY, 1997).

Il est à noter que l'existence du système présent est due à des événements précédents qui ont amené à cet état actuel du système.

L'application de l'approche systémique s'explique par la complexité multidimensionnelle et structurelle de la notion « dégradation des eaux karstiques ». Cette notion est définie par l'interaction des facteurs environnementaux et anthropiques. Comme nous l'avons montré, plus haut, cette démarche permet de représenter, de formaliser, l'existence d'interactions entre les facteurs et met en évidence l'évolution temporelle du système.

Du fait que, la vulnérabilité des eaux karstiques dans le terrain d'application « massif des Béni Snassen » s'exprime par la sécheresse chronique de certaines sources (l'aridité est due au manque de pluies) et la turbidité des eaux (la matière en suspension est prise en charge par les écoulements torrentiels), il s'avère nécessaire de se focaliser sur la surface, là où le pouvoir protecteur du karst est susceptible de contrôler, en grande partie, la recharge du karst interne et son mode d'alimentation (VIAS *et al* 2006).

Les composants du système « vulnérabilité des eaux karstiques »

Dans le cadre de ce travail, l'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère karstique consiste à évaluer la « **perméabilité** » vis-à-vis de la recharge et l'importance de cette recharge et d'apprécier, également, la « **défense** » de l'aquifère karstique. Pour mener à bien ce travail, l'évaluation se focalisera sur la vulnérabilité des couches superficielles du karst. Les zones non saturées et saturées

ne sont pas traitées.

Les facteurs retenus dans l'évaluation et l'évolution du système de vulnérabilité des eaux karstiques sont donc les facteurs susceptibles d'engendrer une dégradation qualitative et/ou quantitative des eaux ou au contraire d'apporter une certaine protection aux eaux karstiques. La figure 6, présente les quatre sous-systèmes en interactions qui ont été identifiés : (i) sous-système « contextes géologique et géomorphologique » qui représentent les paramètres d'état du système, (ii) sous-système « conditions climatiques », (iii) sous-système « couverture bio-pédologique » et (iv) sous-système « Homme », ces trois derniers sous-système présentent les paramètres variables du système c'est-à-dire qui évoluent selon différentes temporalités. Les quatre sous-systèmes contrôlent le fonctionnement et l'évolution spatio-temporelle du système « vulnérabilité des eaux karstiques ». L'interaction de ces paramètres permet d'évaluer la vulnérabilité des ressources en eau karstiques et de mettre en évidence son évolution temporelle.

Les paramètres du système seront étudiés avec précision dans la première partie de ce travail.

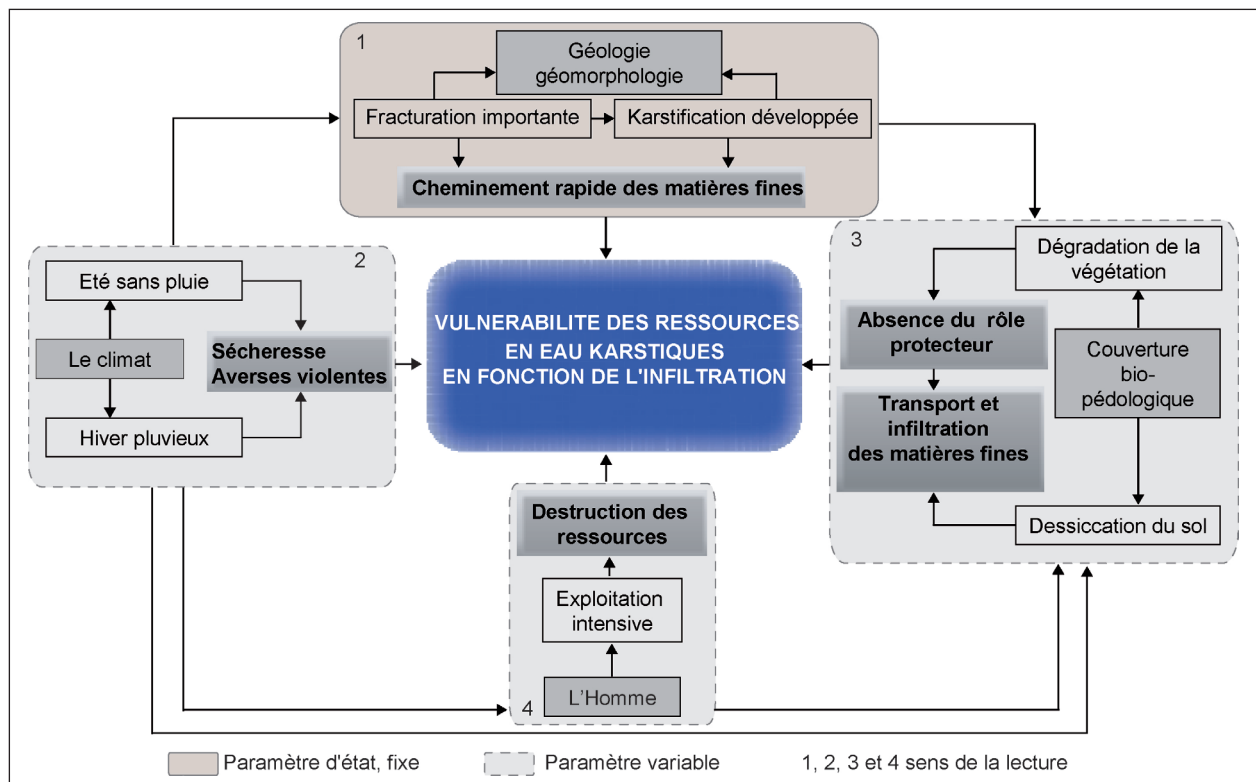


Figure 6 : facteurs intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques.

Echelle d'application de l'approche systémique

Pour une gestion durable des eaux karstiques, il est nécessaire de définir une échelle d'étude « spatiale » et « temporelle » pertinente. Celle-ci doit englober l'ensemble des processus intervenant sur la dégradation des eaux karstiques et ceux pouvant, *à contrario*, amener à une protection du karst.

Echelle « spatiale »

Dans la mesure où, nous ne disposons pas des limites souterraines des bassins d'alimentation dans le secteur étudié, nous considérons que les terrains non karstiques imperméables alimentent le système karstique en favorisant le ruissellement des eaux de pluies. Les limites du système hydrologiques seront donc basées sur les limites des deux bassins versants : Zegzel et Béni Ouaklane.

Echelle « temporelle »

La situation actuelle du massif des Béni Snassen est le résultat des différentes phases d'évolution du territoire depuis l'époque coloniale. Trois périodes ont été identifiées : (i) coloniale, (ii) postcoloniale et (iii) actuelle. Au cours de ces trois phases de mutation, les paramètres variables ont été profondément modifiés (dégradés et/ou renforcés). Ceci a engendré l'évolution temporelle du système « vulnérabilité des ressources en eau karstique ».

4.3. Creation d'un SIG

La création d'un SIG est indispensable dans notre approche. L'interdisciplinarité de la problématique posée, l'application d'une méthode croisant plusieurs paramètres nécessitent la création d'une base de données volumineuse.

Dans l'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau karstique, le SIG est un outil double :

- **un outil d'analyse** qui permet d'effectuer des *traitements géographiques* (croisement, superposition, modification, extraction de couches, etc.). Le SIG intervient également comme un *outil statistique* par le calcul et l'application des formules mathématiques compliquées ;
- **un outil de communication** qui permet la *visualisation* rapide des données tout au long de l'étude, il permet également la *classification*, la *hiérarchisation* des données, la *création des cartes* lisibles et compréhensibles à tout les acteurs eaux : population, élus, décideurs, scientifiques etc.

Les cartes de vulnérabilité constituent une base d'information essentielle pour la gestion des ressources en eau.

Le principe général de la réalisation des cartes de vulnérabilité repose sur la combinaison des facteurs qui caractérisent chacun une propriété du milieu, dont le rôle est plus ou moins important vis-à-vis des sensibilités des aquifères karstiques.

4.4. Méthode multicritères « PPILK »

De nombreuses méthodes existent pour cartographier et évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique (CUCCHI *et al.*, 2007 ; DOERFLIGER *et al.*, 1996, 1998 ; JEANNIN *et al.*, 2001 ; PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000 ; PLAGNES *et al.*, 2006 ; VIAS *et al.*, 2006). Ces méthodes restent plus adaptées à un milieu tempéré où les données sont nombreuses et disponibles. Ces méthodes auraient pu être utilisées pour étudier la vulnérabilité des ressources du massif des Béni Snassen qui reflètent l'image de la fragilité des eaux karstiques d'une moyenne montagne

méditerranéenne.

Cependant, nous avons adapté ces méthodes au milieu méditerranéen semi-aride compte tenu des paramètres environnementaux et anthropiques communément utilisés dans ces approches. Compte tenu aussi des lots de données disponibles. Ceci nous conduit à proposer une méthode plus appropriée : la méthode « **PPILK** » : (i) les **P**récipitations (précipitations moyennes interannuelles, intensité pluviométrique), (ii) la couverture **P**rotectrice (perméabilité, épaisseur du sol et des formations superficielles), (iii) l'**I**nfiltration (formes exokartiques, pente et occupation du sol : densité du couvert forestier, champs cultivés et zones de pâturage), (iv) la **L**ithologie et (v) la **K**arstification (formes endokarstiques). Le paramètre **Homme** est évalué par l'évaluation des occupations du sol et le couvert forestier : les pratiques anthropiques peuvent *dégrader* (activités agro-pastorales de montagne) ou *renforcer* (forêt) le caractère régulateur de la couverture biopédologique.

La mise au point de cette méthode est inspirée essentiellement des méthodes suivantes :

« **EPIK** » (DOERFLIGER *et al.*, 1996, 1998), développée par le centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel (Suisse),

« **RISKE** » (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000), développée par le BRGM à Montpellier,

« **COP** » (VIAS *et al.*, 2006), développée par le département de géographie de l'université de Malaga (Espagne).

La dernière a retenu notre attention car elle s'intéresse particulièrement à la dynamique de l'infiltration associée aux paramètres de surface et aux pluies. Cette méthode a déjà été adaptée pour des terrains karstiques en Afrique du Sud (LEYLAND *et al.*, 2010) et nous proposons ici une méthode assez similaire dans l'esprit, basée sur le croisement de paramètres caractéristiques du milieu.

La particularité de la méthode « **PPILK** » permet de mener une double approche dans l'étude de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques. Le croisement des paramètres composant le système permet de réaliser une approche spatiale de la vulnérabilité. Celle-ci délimite les zones sensibles selon l'importance du poids testé de chaque paramètre (figure 4). Les cartes obtenues seront interprétées et discutées. Les plus pertinentes seront retenues pour définir les zones vulnérables sur l'ensemble du système délimité. Ces zones nécessitent une intervention immédiate pour assurer une gestion durable des ressources en eaux karstiques.

Les cartes présentant l'approche temporelle de la vulnérabilité permettent d'apprécier la variabilité de la vulnérabilité d'une période à une autre. L'évolution de la vulnérabilité temporelle dépend de l'importance du facteur de protection des paramètres à caractère variable comme l'occupation du sol, la répartition interannuelle des précipitations, l'intensité pluviométrique, etc. (figure 7).

5. Plan de thèse

Pour répondre à la problématique de recherche développée ci-dessus, le présent travail se divise en deux grandes parties.

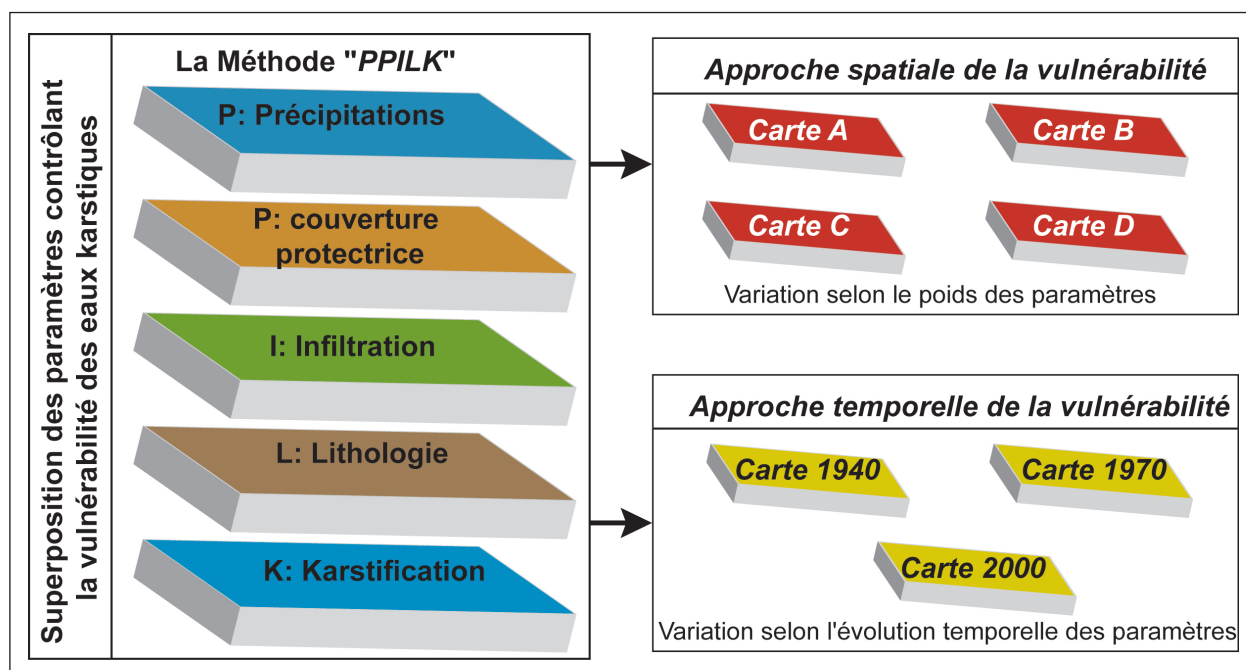


Figure 7 : Objectifs de la méthode « PPILK » approche spatiale et temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques.

- **première partie « les éléments du système »** (comprenant deux chapitres) est consacrée à l'élaboration d'une approche analytique des paramètres intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques. Le premier chapitre aborde les paramètres d'état du système (géologie et géomorphologie). Le deuxième chapitre évoque les paramètres variables influençant le système (le climat, la couverture bio-pédologique et l'Homme). Cette partie permet de présenter et de définir les composants du système (fixes et variables) d'une manière dépendante sans appréhender les interactions de différents sous-systèmes ;
- **deuxième partie « méthodologie d'analyse spatiale »** (comprenant trois chapitres) traite trois volets importants : (i) interaction de différents sous-systèmes par la composition du système vulnérabilité des eaux karstiques. Ceci permet la mise en évidence des agencements entre les composantes du système. La spatialisation, la superposition et le croisement de l'ensemble des paramètres, s'effectuent par la mise en place et l'exploitation d'un Système d'Information Géographique (SIG). Ce SIG englobe aussi bien une base de données spatiales (différents types de cartes), qu'une base de données thématiques qui repose sur un inventaire et analyses physicochimiques de trente sources suivies, base de données de la perméabilité de sol, base de données des informations climatiques et socio-économiques, etc. (ii) analyse spatiale de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques par la pondération multicouches des paramètres contrôlant l'infiltration et l'écoulement des eaux souterraines et (iii) analyse temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques qui repose sur des phases de mutation pendant lesquelles les paramètres variables ont été profondément modifiés (dégradés et/ou renforcés).

PARTIE I

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES EN MILIEU MÉDITERRANÉEN SEMI ARIDE »

INTRODUCTION PARTIE I

La première partie de ce travail constitue une description analytique des éléments du système « *vulnérabilité des ressources en eaux karstiques* ». Elle est composée de deux chapitres qui permettront d'aborder les deux types de sous systèmes de la problématique posée : « *évaluation des eaux karstiques* ».

Le chapitre 1 abordera les sous systèmes désignant les « *paramètres fixes* ». Il regroupe les trois composants suivants : (i) le *réseau hydrographique*, (ii) la *géologie* et (iii) la *géomorphologie*.

A ce propos, le *réseau hydrographique* constitue un élément à double comportement vis-à-vis des aquifères karstiques. En effet, pendant la période humide, le *réseau hydrographique* participe à l'alimentation des aquifères via les pertes situées au niveau des contacts lithologiques. En revanche, pendant les basses eaux (de mars à mai) la situation s'inverse, les aquifères karstiques alimentent le réseau hydrographique, d'où la présence d'un écoulement quasi permanent des oueds en aval des sources karstiques. Quant à la *géologie* et la *géomorphologie*, l'action conjuguée de ces deux facteurs contrôlent, en grande partie, le mode et la nature de l'infiltration et l'écoulement souterrain. La répartition et l'importance des formations lithologiques et des formes exo et endo-karstiques influencent les modalités d'infiltration (concentrée/diffuse) selon le type des formes karstiques qui constituent les points privilégiés de l'infiltration. Dans le cadre de ce travail, et par manque de bases de données complètes, l'*hydrochimie* a été utilisée pour identifier les caractéristiques des eaux souterraines. Pour se faire, différentes méthodes ont été appliquées sur les données récoltées pendant quatre campagnes de terrain.

Les paramètres abordés dans ce chapitre sont considérés comme fixes, c'est-à-dire ne variant pratiquement pas à l'échelle de temps de notre étude.

Le chapitre 2 abordera les « *paramètres variables* » du système. Ils sont au nombre de quatre dont : (i) les précipitations, (ii) la végétation, (iii) le sol, et (iv) les activités anthropiques.

- (i) **Les précipitations** constituent le principal paramètre d'alimentation des aquifères karstiques. Elles se caractérisent par une grande irrégularité spatio-temporelle ce qui conditionne la recharge des aquifères karstiques.
- (ii) **La végétation** présente, quant à elle, un facteur naturel de protection. Elle agit sur la forme, la durée et la nature de l'infiltration des eaux de pluies à travers la couche pédologique. Sa distribution est variable à l'échelle de la zone d'étude. Sa répartition est liée aux facteurs naturels du milieu et aux activités anthropiques
- (iii) **Le sol** est un paramètre régulateur de l'infiltration. Il présente un écran protecteur du karst sous-jacent par rapport aux actions externes. Les propriétés physiques de la couche pédologique donnent des coefficients variables de perméabilité. Ceci provoque soit l'infiltration des eaux de pluies, soit au contraire leur ruissellement
- (iv) **Les activités anthropiques** liées aux pratiques passées et actuelles de l'homme, de même que par ses prises de décisions politiques, favorisent soit le renforcement du système (par la préservation et la protection des ressources naturelles), soit la fragilisation de celui-ci en agissant négativement sur les autres sous systèmes (dégradation du milieu naturel).

Les sous systèmes abordés dans ce chapitre évoluent donc dans le temps et dans l'espace. Leurs évolutions sont variables d'un paramètre à un autre.

L'interaction et l'agencement de différents sous systèmes (fixes et variables) influencent soit directement soit indirectement la vulnérabilité des eaux karstiques.

Cette première approche, nous permettra d'aborder les composants du système et leur spatialisation d'une manière dépendante sans appréhender les interactions des différents sous systèmes qui seront traités en seconde partie.

CHAPITRE 1

PARAMÈTRES D'ÉTAT DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES »

1.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le contexte géologique est un paramètre considéré comme fixe dans l'approche développée dans ce travail. Il contrôle en partie l'action d'autres paramètres tels que l'organisation du réseau hydrographique, la nature des sols, la géomorphologie, la végétation etc.

Dans ce chapitre, nous nous contentons de rappeler le contexte géologique régional de la chaîne des Béni Snassen en mettant l'accent sur les traits saillants des principales structures géologiques et ce, en se basant sur (i) les données des récentes cartes géologiques publiées par la direction de géologie relevant du ministère de l'énergie et des mines (Cartes géologiques d'Afhir et de Berkane 2001 et 2004) et (ii) une synthèse de la bibliographie disponible (GENTIL, 1908; BOUDCHICHE, 1994; CHAIEB, 1994; LAOUINA, 1987; MEZRHAB, 1994; NACIRI, 1986, 1994; OUAHHABI, 1994; BOUABDELLAH *et al.*, 2004; MARHOUMI, 1984; REDDAD, 1993; BEN ABDELLAH, 1952)

En effet, la chaîne des *Béni Snassen* constitue le prolongement nord oriental de la chaîne du Moyen Atlas (PIQUÉ, 1994). Elle se présente comme un vaste bombement elliptique, orienté approximativement E-W. Son axe creusé par l'érosion, met à l'affleurement des terrains paléozoïques sur lesquels reposent en discordance majeure des terrains méso-cénozoïques (figures 1.1 et 1.2).

Le socle hercynien est constitué par des schistes, des grès et des quartzites attribués au Dévonien inférieur (MARHOUMI, 1984), localement recoupés par un pluton granitique (Granite de Béni Snassen) à affinité calco-alkaline (El Hadi *et al.*, 2000) daté à 247 ± 7 Ma (MRINI *et al.*, 1992).

Le socle paléozoïque, affleurant à la faveur d'une large boutonnière hercynienne allongée E-W sur 25 km de long sur 6 km de large, est recouvert en discordance majeure par des séries triasico-jurassiques. Le Cénozoïque est représenté localement par des dépôts miocènes principalement sur la bordure orientale de la chaîne (NACIRI, 1986).

La chaîne des Béni Snassen est subdivisée en deux blocs lithostructuraux distincts ; soient les Beni Snassen orientaux et occidentaux, situés de part et d'autre d'une faille majeure orientée NW-SE bien visible, au niveau du village de Tafouralet (figure 1.2).

Les Béni Snassen orientaux correspondent à un dôme anticlinal dont l'axe principal est orienté vers le nord (figure 1.2). Cette orientation structurale est à l'origine de la répartition des affleurements de la couverture méso-cénozoïque. Le versant nord correspond à la retombée normale des couches triasiques et jurassiques qui s'enfouissent sous la plaine des Triffa (figure 1.1). La retombée méridionale est plus compliquée, des anticlinaux secondaires correspondent à l'orientation de la structure générale. Des failles d'orientation NW-SE découpent la structure plissée en compartiments.

Les Béni Snassen occidentaux, ou Béni Mahiou, constituent un massif nettement plus étalé, avec en particulier une nette avancée vers le S au niveau de la ville d'El Ayoun (Figure 1.1). Ce massif se caractérise par le développement d'une puissante série du Jurassique supérieur. Du point de vue tectonique, les structures dominantes sont représentées par des plis à grands rayons de courbures associés à des failles (NACIRI, 1986). Les pendages y sont faibles.

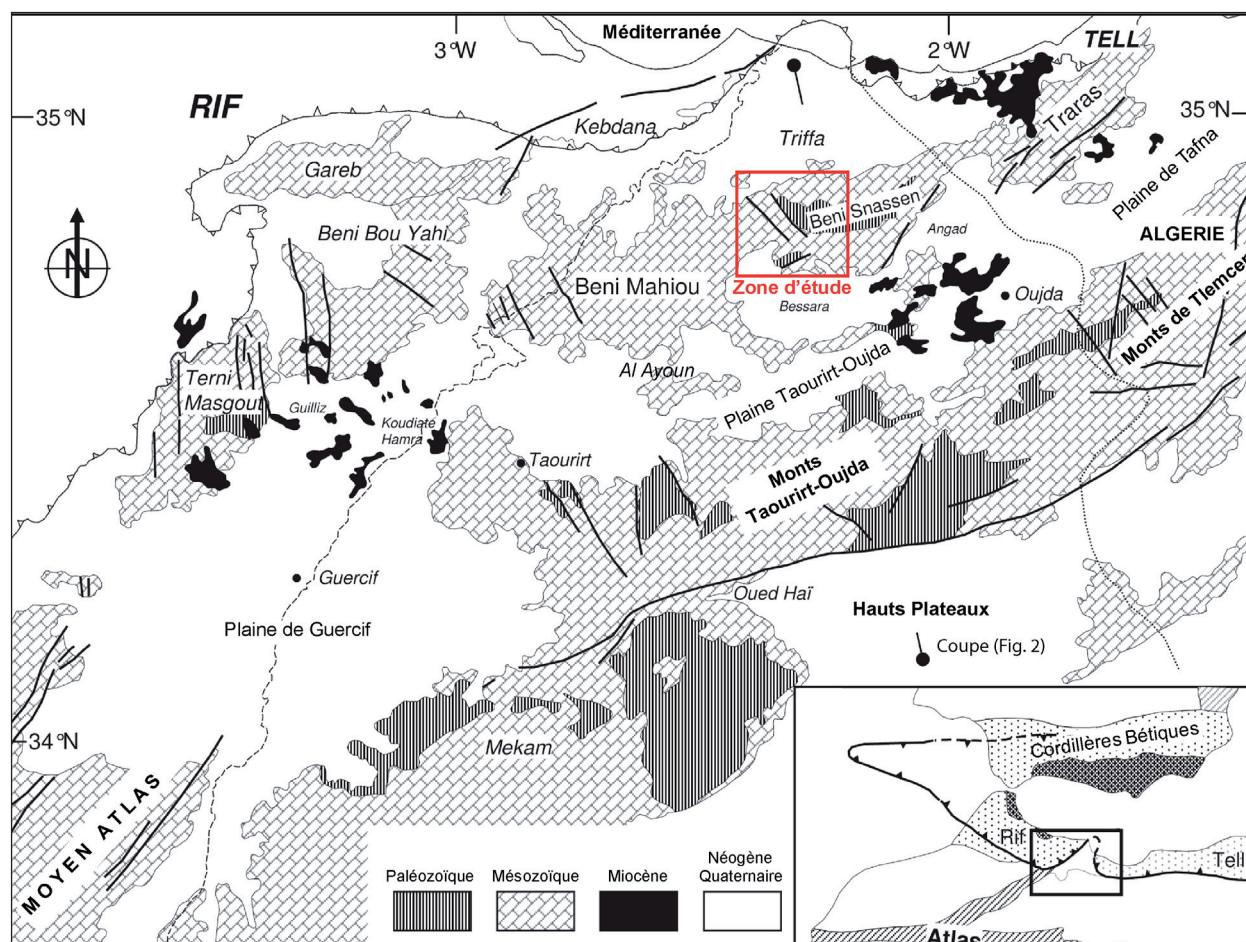


Figure 1.1 : Affleurements des grandes formations géologiques de la région nord orientale du Maroc avec localisation de la zone d'étude, d'après : (El HAMMACHI *et al.*, 2006).

1. Lithostratigraphie

Deux ensembles litho-stratigraphiques majeurs composent la chaîne des Beni Snassen (figures 1.2 et 1.3).

1.1 Les terrains paléozoïques

Les terrains paléozoïques apparaissent au cœur et sur les bords de la chaîne au niveau des boutonnières d'*Ez Zerga*, *Aïn Sfa* et *Béni Moussi Roua*. Ils sont constitués de schistes gris vert, légèrement ardoisiers, d'une épaisseur moyenne de 600 m, intercalés de bancs de quartzites, de grès ou localement d'arkose ou de microbrèches (NACIRI, 1986). Ces schistes, datés du Dévonien (Marhoumi, 1984), sont localement recoupés du pluton granitique des Beni Snassen daté à 247 ± 7 Ma (Rb/Sr) (MRINI *et al.*, 1992) ; cet âge étant probablement relié à une phase de rajeunissement ayant affecté le pluton (GASQUET *et al.*, 1996).

Péetrographiquement, le granite des Beni Snassen est formé de deux faciès principaux dont la granodiorite à affinité calco-alkaline et le monzogranite, d'origine crustale, intrusif dans la granodiorite (REDDAD, 1993 ; EL HADI *et al.*, 2003).

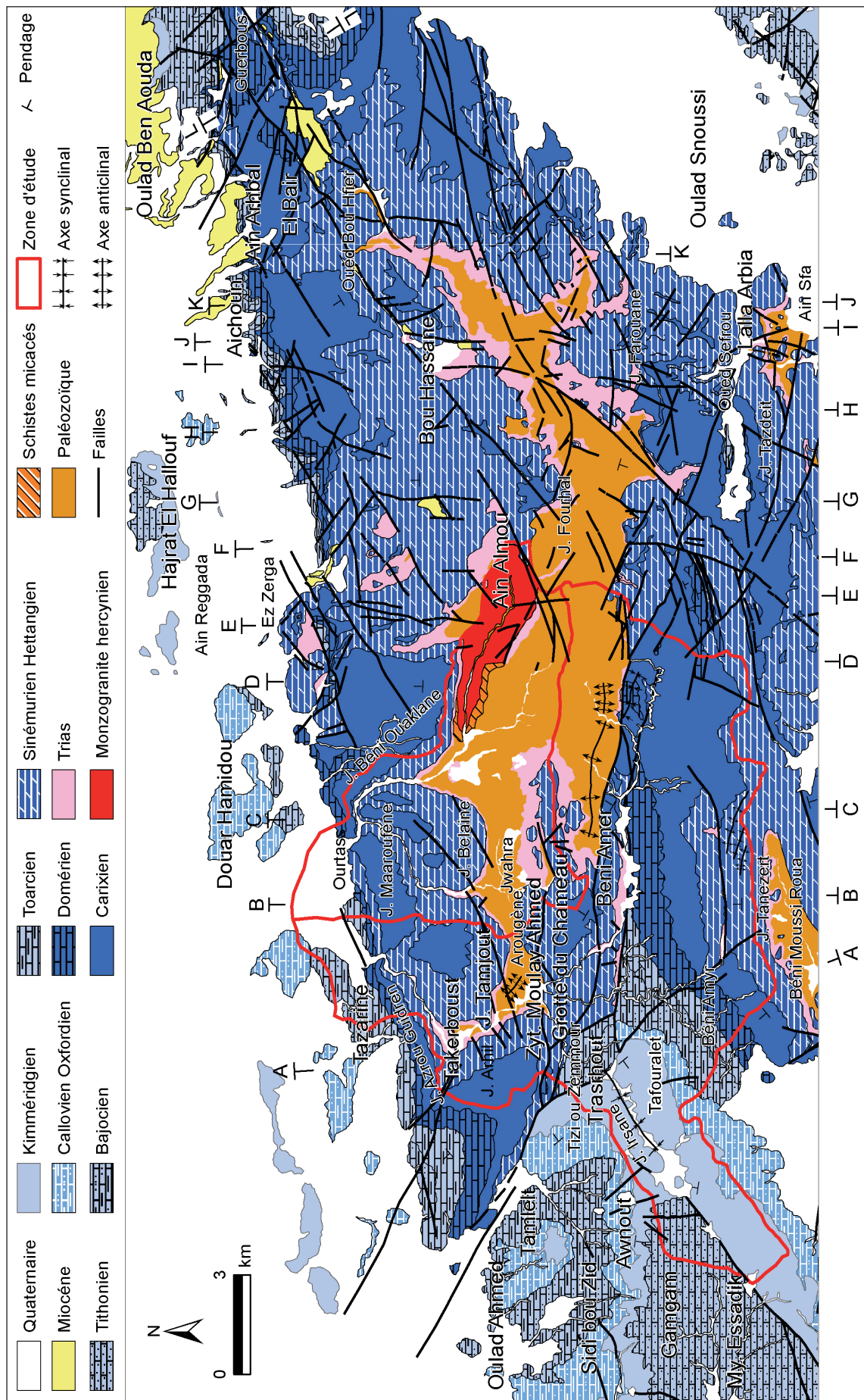


Figure 1.2 : Carte géologique des Beni Snassen orientaux (extraite et modifiée d'après cartes géologiques 1/ 50 000 de Berkane et Ahfir du (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie 2001, 2004)).

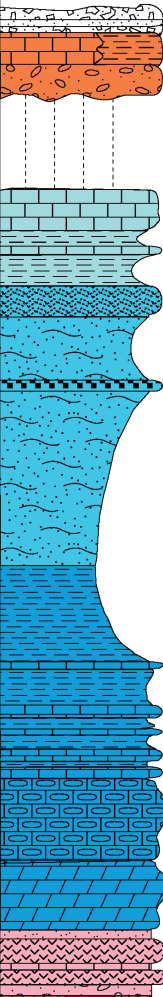

Age		Lithologie Ensemble	Epais (m)	Disc. maj.	Colonne lithologiques	Sédiment et magmatisme	Déformations : caractéristiques et styles	
Quaternaire						Alluvions, sables et limons Encroûtements calcaires+andésite Molasses	Distension/compression : fini-tertiaire et Quaternaire	
Tertiaire	Pliocène	Détritique	>60	D6				
	Miocène							
Crétacé-Paléogène							Phase atlasique Plis droits, très lâches à large amplitude. Direction E-W	
Mésozoïque	Malm	Kimméridgien	Carbonaté	F	>1 000	Plate forme carbonatée	Phases extensives mésozoïques Réactivation extensive d'anciens accidents Tectonique en horsts et grabens de direction ENE-WSW par des failles normales synsédimentaires de directions ENE-WSW et NW-SE	
		Portlandien						
		Oxfordien	Détritique	F	>500	Dépôts deltaïques		
		Dogger	Callovien	Mameux	D	>250		Marnes à Posidonomyes, argiles et silts vers le haut
			Bathonien					
	Bajocien		Marno-calcaire	C	50-200	Marnes d'Anou Midra Calcaires à Zoophycos Alternance marno-calcaire		
	Aaléno-Bajocien							
	Toarcién							
	Domérién							
	Lias	Carixien	Calc. à silex	B	10-200	Calcaires à silex		
		Lotharingien	Dolomitique	A	40-200	Plate forme carbonatée Dolomies/Calcaires		
Trias	Volcano-sédimentaire			0-150	Détritismes rouges, calcaires et dolérites	Compartimentation du bassin selon une direction N70-90, N135-160 et N30-40, volcanisme fissurale basique		
Paléozoïque	Dévorien			>500			Phase de déformation éovarique Phase Bretonne : Plissement+schistosité Phase post-westphalienne : plissement ENE-WSW +schistosité	

Figure 1.3 : Log stratigraphique synthétique montrant les successions des grands ensembles lithostratigraphiques de la chaîne des Beni Snassen, d'après : (NACIRI, 1986) modifié par (EL GOUT *et al.*, 2009).

1.2 Couverture mésozoïque

En discordance majeure sur le socle paléozoïque, se dépose une puissante série mésozoïque dont les affleurements carbonatés caractéristiques constituent le bâti orographique de la région.

Trias

Les affleurements du Trias forment une ceinture autour du socle paléozoïque. Ce dernier disparaît là où les failles inverses ou décrochantes ont provoqué la juxtaposition du Lias et du Paléozoïque.

Pris dans une séquence complète, le Trias dont l'épaisseur montre d'importantes variations (150 m *J. Tanezert*, 110 m *J. Bouhammed* 75 m à *J. Farouane*, 70 m *Aïn Almou* et à *Hassi Zerga* et 40 m *Tizi*) (Figure 1.4) montre depuis la base jusqu'au sommet de la séquence lithologique la

Photo 1.1 : Vue panoramique montrant les différents faciès composant le Trias de la chaîne des Béni Snassen (jbel Tazdeit).



Jurassique

Les terrains du Jurassique forment l'essentiel des affleurements de la chaîne des Béni Snassen (figure 1.2). Ils sont représentés par des faciès essentiellement carbonatés qui peuvent atteindre localement des épaisseurs importantes (supérieure à 500 m). Les travaux stratigraphiques et sédimentologiques de détail permettent de distinguer 6 ensembles lithostratigraphiques dont les âges respectifs varient du Lias inférieur au Kimméridgien moyen-Tithonique (NACIRI 1986) ; BOUDCHICHE, 1994 ; NACIRI, 1994 ; OUAHHABI, 1994).

Lias inférieur

Le Lias inférieur est constitué successivement de bas en haut de 4 termes principaux dont :

- un conglomérat de base concordant sur le Trias ;
- une assise dolomitique, d'une épaisseur variant de 30 à >80 m, constituée de bancs peu différenciés de dolomies, et formant la plupart des escarpements auréolant la boutonnière paléozoïque (photo 1.2) ;
- des calcaires dolomitiques communément en bancs stratifiés, métriques (~2 m), localement d'aspect ruiforme. La puissance de ce terme est très variable : 100 m à Azrou Guidren, 40 à 60 m jbel Arhil à jbel Fourhal et à Oued Bou Hfier et très réduite ou absente à jbel Maaroufène, jbel Tamajout, jbel Beni Ouklane et jbel Tanazert ;
- Un niveau condensé à encrines ou à brachiopodes sur lequel se dépose des calcaires dolomitiques stratifiés de couleur grise, riches en crinoïdes, en éléments détritiques, en bioclastes de rhynchonelles silicifiées et à quelques passées oolithiques. Ce niveau dont l'épaisseur atteint plus d'une soixantaine de mètres à Azrou Guidren et à jbel Maaroufène est absent au niveau des jbel Fourhal, Tamajout, Beni Ouklane et Tanazert.

Carixien-Domérien inférieur

Le Carixien-Domérien inférieur est caractérisé par ses faciès franchement marins. Il correspond à une succession monotone de bancs de calcaires ou de calcaires dolomitiques à silex dont l'épaisseur varie de 0,1 à 1 m (NACIRI, 1986).

Photo 1.2 : Vue panoramique montrant la disposition des assises dolomitiques du Lias inférieur au niveau de Jbel Tamajout.



Photo 1.3 : Bancs calcaires du Carixien (jbel Arhil Acham).



L'ensemble Carixien-Domérien inférieur peut être subdivisé en trois sous-ensembles. Les premières assises sont constituées par une alternance de bancs de calcaires de plus d'un mètre d'épaisseur nommée par GENTIL (1908) et MONITION (1962) « dalles inférieures ». Viennent ensuite les bancs de calcaires micritiques sombres riches en concrétions siliceuses et dont l'épaisseur varie de 0,1 à 0,3 m. Ces derniers sont coiffés à leur sommet par les calcaires lités noirs riches en matière organique, épais de 0,1 à 0,3 m, et où les nodules de silex sont très fréquents.

Domérien, Toarcien et Aalénien

Le Domérien, le Toarcien et l'Aalénien diffèrent nettement des précédents étages par leurs allures, leurs morphologies et leurs lithologies. Lithologiquement, ils sont constitués de marnes et de marno-calcaires (photo 1.4). Ces faciès surmontent en concordance les calcaires à silex et ne sont conservés que dans les collines bordant le flanc N de la chaîne (i.e., Béni Amyr, synclinal de l'Oued Sefrou au S, Trhasrout à l'W et l'extrémité orientale de la chaîne).

Photo 1.4 : Vue panoramique montrant les alternances marno-calcaires du Toarcien près de Trasrout.



Trois sous-ensembles y sont reconnus dont :

- les calcaires micritiques ou sparitiques de base se présentant sous forme d'une alternance de bancs de couleur grise et d'épaisseur variant de 0,2 à 0,8 m ;
- les alternances régulières de marnes et de marno-calcaires esquilleux de teinte gris-verdâtre, disposés en bancs de 5 à 15 cm d'épaisseur, avec localement des intercalations de bancs de calcaires micritiques bleutés de 10 à 20 cm d'épaisseur ;
- les alternances rythmiques de marnes et de marno-calcaires de teinte rouge-ocre excédant rarement 20 m d'épaisseur et n'affleurant sur la bordure N de la chaîne.

Bajocien-Bathonien-Callovien

Le Bajocien-Bathonien-Callovien, de composition essentiellement marneuse à passées calcaires, est constitué de deux termes :

- Le premier terme, d'épaisseur réduite (15 à 20 m) affleure uniquement au sommet des

premières collines marneuses bordant la chaîne au nord et à Béni Amyr à l'ouest. Cee terme, nommé « dalles supérieures » (GENTIL 1908), est constitué d'une succession de bancs de calcaires, épais de 20 à 40 cm, devenant noduleux leurs sommets.

- Le second terme est formé d'une épaisse série schisteuse de marnes (>200 m) de teinte grise, verte, ou ocre avec localement de minces intercalations de bancs centimétriques de calcaires marneux.

Oxfordien-Kimméridgien inférieur

L'Oxfordien-Kimméridgien inférieur correspond à un complexe terrigène très épais (> 500 m), composé de deux niveaux identifiables :

- un niveau inférieur à dominante argileuse constitué de marnes et d'argiles vertes s'enrichissant progressivement en grès tendres ou consolidés, de teinte verte à grise ou rousse ;
- un niveau supérieur à dominante gréseuse. Les grès disposés en bancs de taille métrique sont communément de teinte jaune et à grains grossiers.

Kimméridgien moyen-Tithonique

Le Kimméridgien moyen-Tithonique d'une épaisseur variant de 200 à 300 m (NACIRI, 1986). Il constitue les principaux affleurements des Beni Snassen occidentaux. Il est constitué par des alternances régulières de nature calcaréo-dolomitique et gréseuses.

1.3. Cénozoïque : Néogène

Miocène

Après une grande lacune sédimentaire comprenant tout le Crétacé, le Paléogène et la base du Néogène se dépose, en discordance angulaire sur le Jurassique et le Trias, une assise molassique constituée de conglomérats, de grès et d'argiles annonçant la transgression miocène. En fait, il est très rare de trouver des témoins de cette sédimentation tertiaire et, en particulier, dans toute la zone centrale, la plus haute et donc la plus disséquée par l'érosion. A l'est de la chaîne, le piémont a été dénudé de toute couverture néogène, son pied en revanche n'est fossilisé que par des dépôts quaternaires. A l'extrémité orientale de la chaîne, au niveau du col frontalier du Guerbous, les affleurements du Miocène surgissent au Sud de la ville d'Ahfir sur le piémont entre Arhbal et Ahfir (cf. figure 1.5) sous forme de deux ensembles lithostratigraphiques distincts rattachés au Miocène inférieur et Supérieur. A ce propos, le Miocène inférieur est constitué de bancs conglomératiques à ciment gréseux à nombreuses intercalations marno-sableuses, surmontés par un poudingue sommital qui s'enfonce sous les accumulations plio-quaternaires d'Ahfir. Quant au Miocène supérieur, il est représenté par des marnes gréseuses dures et des calcaires marneux à patine verdâtre, épais d'une cinquantaine de mètres, au dessus desquels viennent des calcaires rubanés siliceux et des marnes vertes gypseuses coiffées à leur tour par des calcaires marneux en plaquettes. La présence de tufs micacés est caractéristique du Miocène supérieur (CARLIER, 1971).

Pliocène

Le pliocène dont les affleurements sont réduits à la bordure Nord de la plaine des Triffa, se présente sous forme d'une épaisse succession (40m-150m) de marnes grisâtres à verdâtres à intercalations évaporitiques surmontées de bancs gréseux localement à surface ferrugineuse.

1.4 Quaternaire

Le quaternaire dont les faciès lithologiques constituent l'un des principaux aquifères du Maroc oriental, affleure au niveau de toutes les vallées composant la chaîne des Béni Snassen. Plusieurs systèmes y sont reconnus (LAOUINA, 1987 b).

Villafranchien

Le Villafranchien dont l'épaisseur moyenne varie de 2m à 70 m (EL MANDOUR, 1998) affleure près de la ville d'Ahfir (figure 1.5) et au Nord de la plaine d'Ahfir sous forme de bancs calcaires et de calcaires marneux surmontés localement par des conglomérats et/ou de calcaires « travertineux »

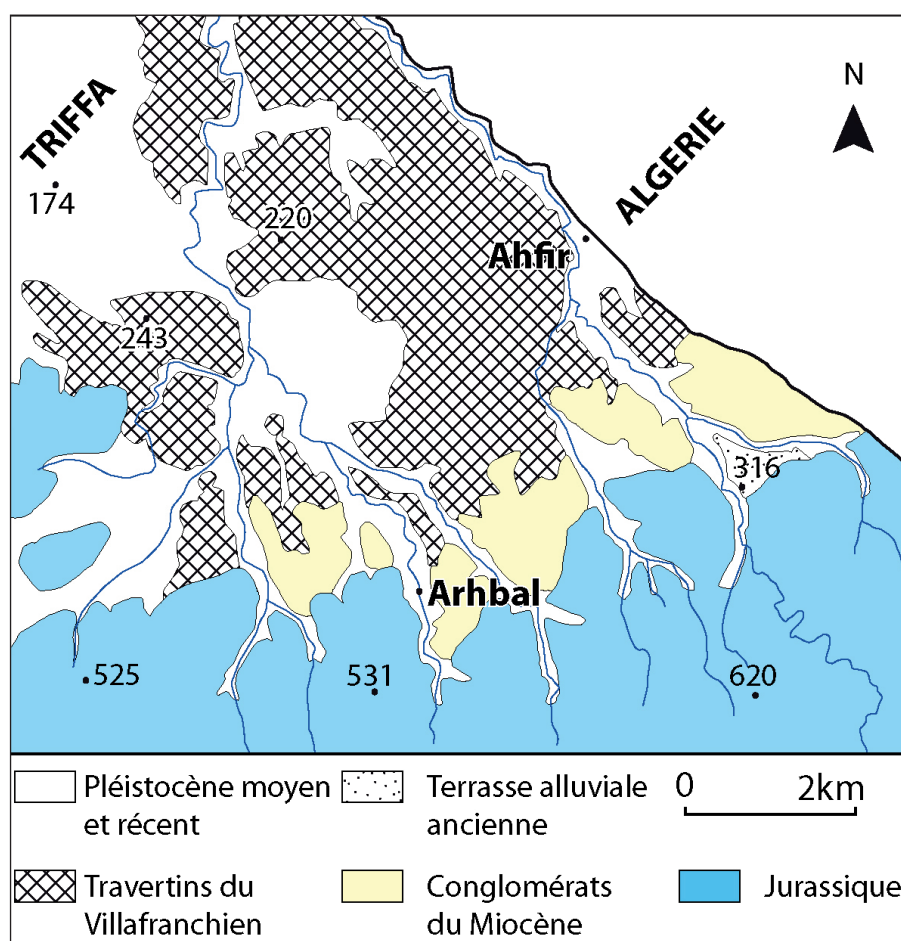


Figure 1.5 : Le piémont d'Ahfir, zone de plateau ondulé à larges accumulations travertineuses, d'après (LAOUINA, 1987 b).

Salétien

Le Salétien dont les affleurements sont limités au cône de déjection de la chaîne des Beni Snassen et le long de l'Oued Cherraâ se présente sous forme de terrasses caillouteuses.

Amérien et Tensiftien

Les affleurements rattachés à l'Amérien et le Tensiftien sont constitués de limons rouges et de croûtes feuilletées à nodules blanches de calcaires.

Soltanien-Rharbien

Les faciès du Soltanien et du Rharbien sont constitués de limons rouges et d'alluvions fines sableuses non encroûtées recouvrant l'ensemble des dépôts précédents.

Les formations Quaternaire seront abordées dans la partie géomorphologie.

2. EVOLUTION STRUCTURALE

Les formations du socle paléozoïque au même titre que celles de la couverture méso-cénozoïque ont subi les effets conjuguées des orogénèses hercynienne et atlasique (i.e., alpine) conduisant à l'individualisation d'une panoplie de structures tectoniques souples (plis et schistosités associées) et cassantes (failles essentiellement). Les structures atlasiques dont les directions sont héritées du jeu de la phase hercynienne (i.e., directions ENE-WSW, E-W et WNW-ESE) sont reliées à la convergence entre les plaques africaine et européenne.

Quatre phases de déformation hercynienne associées à un métamorphisme de type schistes verts sont reconnues conduisant à l'individualisation de divers styles de plis et schistosités associées (HOEPFFNER, 1987 ; CHAIEB, 1994).

Quant à l'orogénèse alpine, elle débute par une phase d'extension triasique liée à la phase de rifting atlantique, qui se prolonge jusqu'au Crétacé. Les phases compressives successives se développent durant le Tertiaire jusqu'au Miocène supérieur.

2.1. Cycle Hercynien

La série paléozoïque de la chaîne des Beni Snassen, constituée d'une série de type flysch, a subi les soubresauts de quatre phases tectoniques (HOEPFFNER, 1987 ; CHAIEB, 1994).

- La 1^{ère} phase Bretonne (HOEPFFNER, 1987), Namurienne selon (CHAIEB, 1994) correspond à la phase paroxysmale du cycle hercynien. Une compression de direction E-W s'est traduite par l'individualisation de plis couchés, fréquemment isoclinaux, à vergence ouest, associés à une schistosité dont le plan axial S1 à une direction de N 40° E.
- La 2^{ème} phase, contemporaine de l'emplacement du volcanisme acide-intermédiaire syn-sédimentaire (CHAIEB, 1994);

- La 3^{ème} phase d'âge post-Westphalien est caractérisée par une direction subméridienne de compression maximale. Cette phase est à l'origine de des plis de direction ENE-WSW (N60° à N90°) associés à une schistosité sub-verticale.
- Enfin, la 4^{ème} phase d'âge Stéphanien est marquée par des cisaillements qui ont facilité la mise en place des stocks granitiques à l'origine du développement des importantes auréoles de métamorphisme (100-200 m) ceinturant les plutons.

2.2. Cycle alpin

Le cycle alpin se caractérise par la succession de plusieurs phases extensives se relayant dans le temps avec des phases compressives. A ce propos, six phases de déformations dont une phase distensive débutant au Trias et cinq phases compressives ont été identifiées (NACIRI 1986 ; TORBI *et al* ; 1994 ; TORBI, 1996).

Phase d'extension mésozoïque

Les mouvements extensifs mésozoïques conditionnent la sédimentation des matériaux triasiques et jurassiques. Trois phases y sont communément décrites (HERVOUET, 1985).

- La 1^{ère} phase de rifting d'âge triasique à caractère extensif serait à l'origine de la compartimentation du bassin à partir de la réactivation des anciens accidents hercyniens du socle paléozoïque. Cette phase a été accompagnée par l'émanation des coulées et sills de basaltes tholéiitiques triasiques.
- La 2^{ème} phase est reliée à la subsidence thermique jurassique. La sédimentation durant le Lias et le Dogger est réglée par la subsidence généralisée du bassin. Bien que la compartimentation héritée de l'étage de rifting précédente persiste, le contact entre les dépôts syn-rift et post-rift correspond à une importante discontinuité mise en évidence par le développement des brèches dolomitiques basales du Lias inférieur.
- La 3^{ème} phase datée du Kimméridgien-Crétacé inférieur serait due aux rejeux de failles anciennes à l'origine de la fragmentation du bassin et des importantes variations d'épaisseurs des cortèges sédimentaires.

Phases post-jurassiques

Les phases de déformation post-jurassiques sont reliées à trois épisodes principaux dont (TORBI, 1997):

- une phase compressive subméridienne d'âge Eocène à Tortonien moyen à l'origine des plis N80 et des décrochements dextres N100-150 et senestres N30-60 avec des failles inverses (NACIRI, 1986) ;
- une phase distensive subméridienne d'âge Tortonien supérieur à Messinien donnant lieu à l'ouverture de la plaine des Triffa et le couloir Oujda-Taza en empruntant des failles

normales N70-140 ;

- une phase compressive NW-SE d'âge Pliocène à Quaternaire moyen générant des plis N30 et des fentes de tension N90-110. Cette phase attribuée au Tortonien terminal aurait favorisé le jeu des failles préexistantes en décrochements N120-150 senestes et N50-70 dextres.

Une quatrième phase compressive de moindre importance de direction NE-SW et d'âge Quaternaire récent serait à l'origine des quelques plissements et des basculements enregistrés dans les terrains miocènes.

3. Evolution morphostructurale

Les données lithostratigraphiques et tectoniques déterminent la variété des paysages morphostructuraux. A l'aube de l'ère quaternaire, les volumes de relief et les principales formes ont été déjà acquis. L'individualisation des reliefs est liée soit à la composition lithologique, soit à la tectonique. Les failles normales accompagnant la phase distensive de l'Oligocène ont disloqué la chaîne en deux compartiments : les Béni Snassen orientaux et les Béni Snassen Occidentaux.

La topographie des Béni Snassen est constituée par des crêtes dissymétriques structurales, et des reliefs sommitaux tendant vers l'aplanissement. L'affleurement du noyau paléozoïque se présente comme une crête d'interfluve symétrique.

3.1. Anticlinaux

Les Béni Snassen orientaux exhibent dans leur partie centrale un vaste anticlinal orienté sensiblement E-W. La charnière principale, attaquée par l'érosion, est soulignée par les formations paléozoïques. Le flanc nord de l'anticlinal, avec un pendage moyen de 20° N, est compartimenté par des failles subparallèles (N° 50 à N° 70° E) qui ont provoqué la juxtaposition du Lias et du Paléozoïque. Le flanc méridional est relativement redressé, son pendage décroît progressivement du nord vers le sud. Des failles N 90 à N120° E l'affectent plus à l'Ouest (coupes D, E et F) (figure 1.6).

Associés à cette vaste structure anticlinale, d'autres anticlinaux de moindre ampleur sont à distinguer ; dont :

- **L'anticlinal du Guerbous** à l'Est, à charriage liasique d'orientation N 60° E, se présentant sous forme d'un pli dissymétrique à flanc méridional court et plus redressé à la verticale (pendage 70 N) que son flanc septentrional (figure 1.7) ;
- **L'anticlinal évidé des Béni Moussi Roua** est bordé sur son flanc nord par le crêt normal du jbel Tanezert. Le sommet de ce crêt montre les traces d'un aplanissement qui recoupe les couches en pendage vers le nord. Le revers est coupé par des failles longitudinales de direction E-W rehaussant le substrat triasique. Le front du crêt est un lieu d'enfoncement où de gros placages de dolomies liasiques chevauchent les faciès argileux du Trias. Certains de ces blocs effondrés sont descendus jusqu'au fond de la combe creusée dans le matériel schisteux du paléozoïque. Le crêt méridional chevauche vers le nord, avec des couches fortement redressées (MEZRHAB 2007). Le crêt septentrional de la dépression, porte

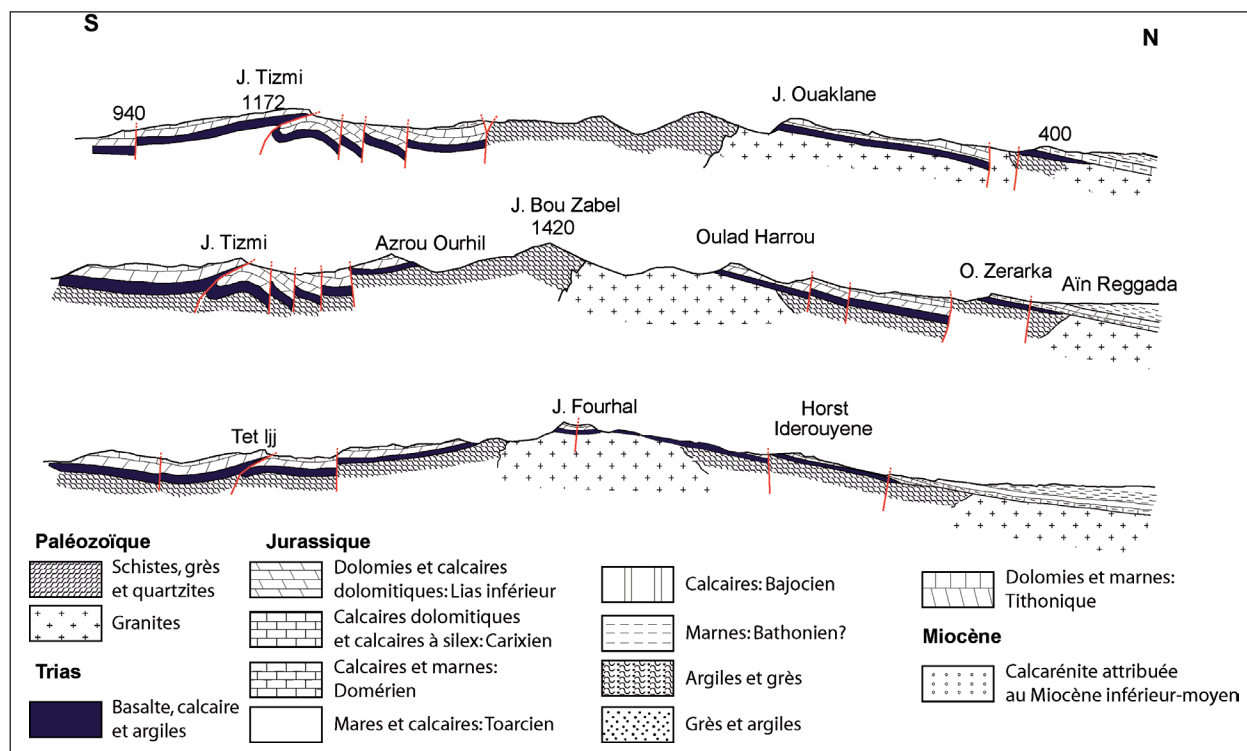


Figure 1.6 : Coupes géologiques sériees N-S montrant les dispositions des principales unités litho-structurales de la chaîne des Beni Snassen, réalisées du massif des Béni Snassen (cf. figure 1-5 coupes D, E et F), d'après (NACIRI 1986).

(Légende cf. figure 1.6).

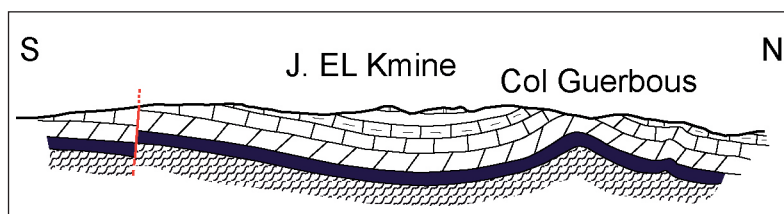
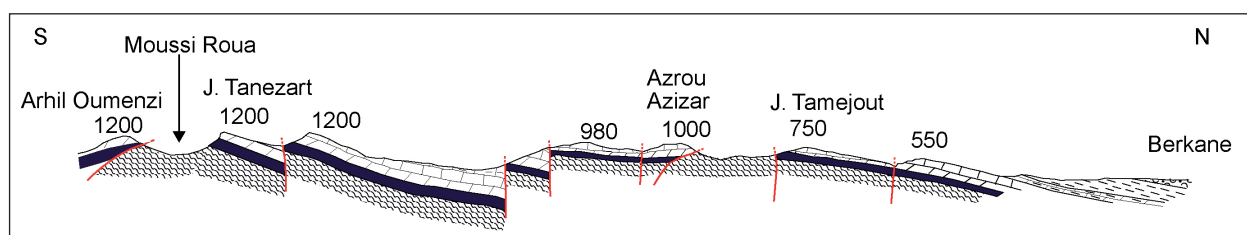


Figure 1.7 : Allure morphostructurale de l'anticlinal de Guerbus (Coupe L), d'après NACIRI (1986).



(Légende cf. figure 1.6).

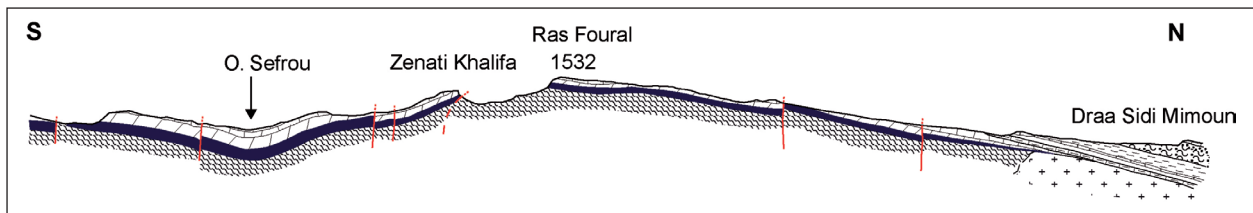
Figure 1.8 : Coupe géologique réalisée le long du transect Berkane-Arhil-Oumenzi (coupe B), d'après NACIRI (1986).

localement des paquets glissés de roches liasiques qui dominent la crête escarpée de jbel Tanezart (MEZRHAB 2007) (figure 1.8). Les glissements sont fixés par l'encroûtement calcaire du Quaternaires moyen (MEZRHAB 2007).

3.2. Synclinaux

Aux structures anticlinales précédemment décrites succèdent des structures synclinales dont les directions sont sensiblement parallèles à celles des anticlinaux.

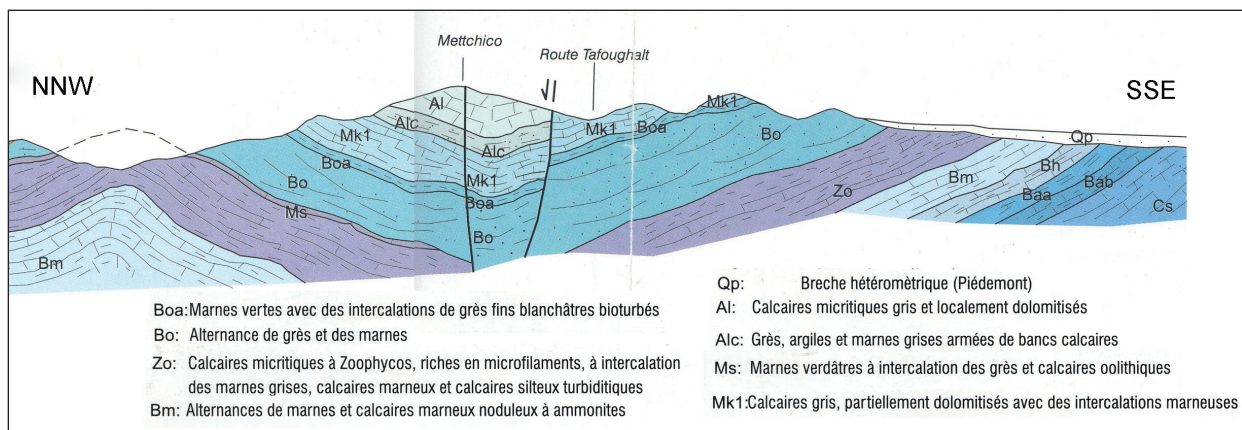
- A l'Ouest (i.e., dans le secteur d'Aïn Sfa), au niveau de la ligne de creux à matériaux domériens (localement toarciens), on voit surgir un synclinal dont les structures s'ouvrent pour constituer le val emprunté par l'oued Sefrou. Ce val s'élargit dans la partie centrale et se resserre à l'ouest (figure 1.9).



(Légende cf. figure 1.6).

Figure 1.9 : Coupe Draa Sidi Mimoun Oued Sefrou (coupe G), d'après NACIRI (1986).

- A l'est, le synclinal de Tafouralet qui constitue le relief le plus important des Béni Snassen occidentaux se trouve actuellement en position perchée par rapport aux anticlinaux évidés qui ont connu une forte érosion au cours du Quaternaire. Il est ouvert à l'ouest de Tafouralet avec une largeur d'environ 5 km, en revanche, il rétrécit à l'est où l'oued Tazemmourt le traverse. Le synclinal est faillé sur son front sud qui domine la vallée des Béni Amyr (figure 1.10).



D'après carte géologique 1/ 50 000 de Berkane du (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie 2001).

Figure 1.10 : Synclinal perché de Tafouralet.

3.3. Bordures de la chaîne des Béni Snassen

Bordure septentrionale

La bordure septentrionale est déterminée par l'érosion différentielle, les couches pendent régulièrement vers le nord, pour s'abaisser, en dessous des séries transgressives néogènes. Des couches moins compétentes alternant régulièrement avec des bancs plus compétents peuvent être distingués. Il s'agit des calcaires kimméridgiens reposant sur les grès marneux du Callovo-Oxfordien, et les marnes du Bajocien; les bancs calcaires de l'Aalénien sur les marno-calcaires du Toarcien ; les calcaires du Lias moyen et les dolomies du Lias sur les formations argileuses ou les coulées basaltiques du Trias.

Le piémont est façonné dans les faciès du Dogger et le Malm. Les dépressions les plus larges se localisent là où les marnes du Bajocien sont épaisses (300 m à Aïn Reggada), alors que là où elles sont biseautées par les formations du Jurassique supérieur, le piémont devient irrégulier, formé d'une suite de crêtes basses convexes discontinues et façonnées dans les calcaires du Kimméridgien. Ces derniers sont limités au nord par un escarpement de faille, ou localement par une flexure bordant la zone des Triffa subsidente au cours du Néogène et du Quaternaire.

A l'extrémité orientale de la chaîne, l'abaissement de l'axe du pli des Béni Snassen, explique la conservation de larges témoins de la surface infra-miocène, couverte par des dépôts conglomératiques et gréseux. La surface s'abaisse progressivement sous les placages miocènes et s'enfonce sous la plaine.

Bordure sud est

Au dessus de la plaine des Angad, la bordure de la chaîne correspond à la fois à la retombée normale du pli fondamental, et à une série d'accidents faillées, cachés par l'épaisse série de dépôts Néogène et Quaternaire.

Bordure méridionale

A Aïn Sfa, le rebord montagneux montre une direction régulière NE-SW déviant brusquement vers la direction W-E au dessus de la dépression des Bessara. Le piémont correspond à un simple palier entre les chaînons d'Aïn Sfa et du Mégrez.

A Bou Houria, l'anticlinal évidé des Béni Moussi Roua s'ouvre sur la plaine à la faveur de failles abaissant sa retombée occidentale.

4. Hydrogéologie

Les relevés lithostratigraphiques déduits à partir des trous de forage de reconnaissance ou des puits implantés dans les plaines de la chaîne permettent de distinguer deux unités hydrogéologiques distinctes nommées A et B (EL MANDOUR, 1998).

➤ *L'unité hydrogéologique A* se présente sous forme d'un couloir au nord de la chaîne des

Béni Snassen emmagasinant deux nappes dont l'une d'elle est phréatique, l'autre captive et profonde. Le réservoir de la nappe phréatique est constitué par les grès du Callovo-Oxfordien, les niveaux calcaires intercalés dans les marnes du Domérien-Bathonien ou encore les alluvions du cône de déjection ou des chenaux des cours d'eau. Quant au réservoir de la nappe profonde, il est représenté par les calcaires dolomitiques et les calcaires du Lias basal-Carixien encadrés de part et d'autre par les argiles rouges du Trias ou les schistes paléozoïques (mur de la nappe) et les faciès marno-calcaires du Domérien-Bathonien (toit de la nappe) ;

- **L'unité hydrogéologique B** occupe 75% des affleurements de la plaine des Triffa et abrite la principale nappe phréatique de la chaîne. La roche réservoir est constituée par soit les calcaires lacustres du Villafranchien et les limons rouges à dragées de calcaires du Quaternaire récent, soit par les conglomérats d'âge plio-quaternaire. Les terrains marneux du Pliocène constituent le substratum de la nappe phréatique.

Après cette introduction géologique générale sur la chaîne des Béni Snassen orientaux, il est important de noter que notre zone d'étude se concentre sur les deux bassins versants de Zegzel et de Béni Ouakalne (figure 1.11).

Conclusion

La chaîne des Béni Snassen se présente comme un vaste anticlinal allongé d'est en ouest. Une faille majeure « faille de Tafouralet » orientée NW-SE le décapite en deux ensembles distincts dont les Béni Sanssens orientaux et les Béni Snassen occidentaux.

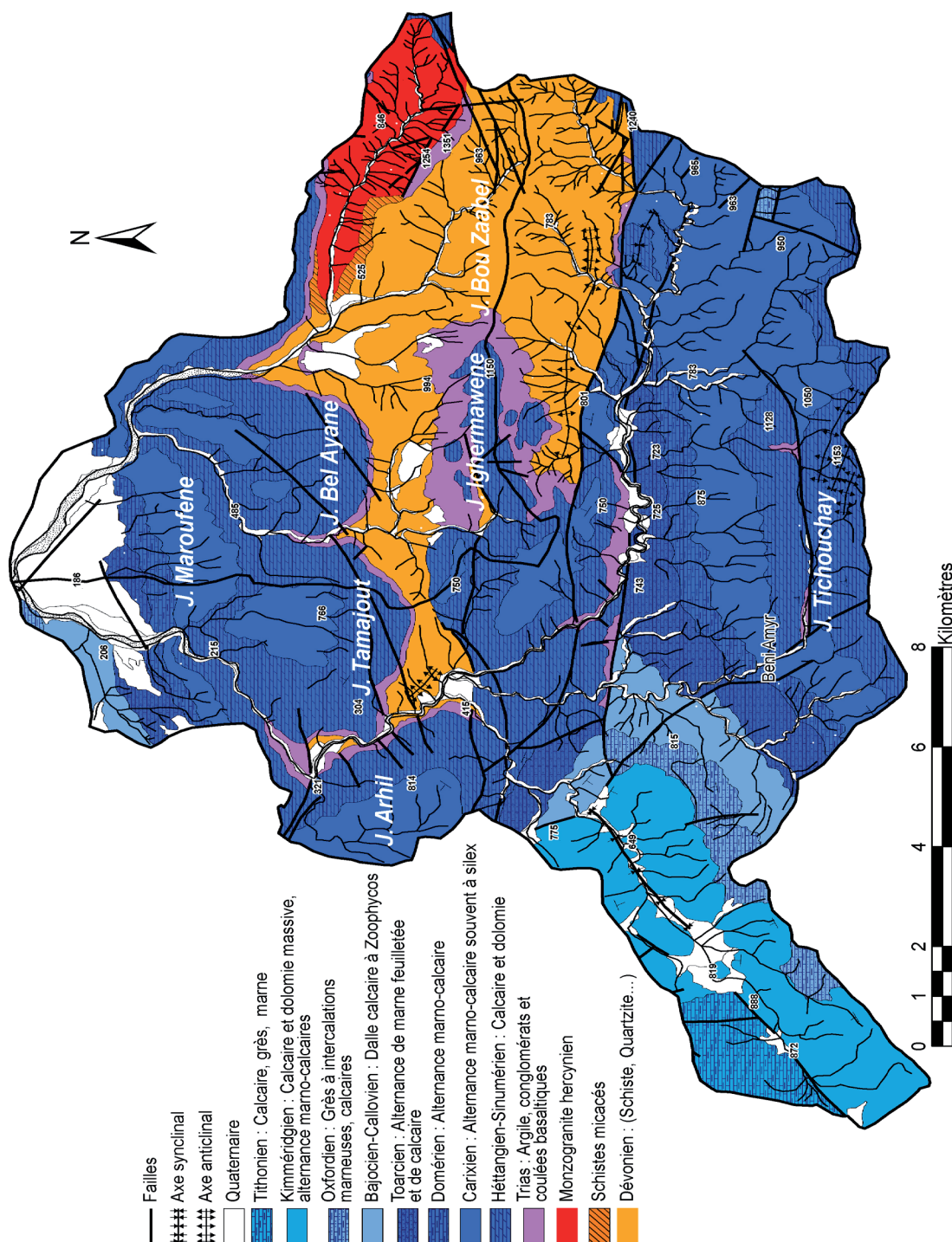
Les Béni Snassen orientaux correspondent à une structure anticlinale dont l'axe principal est constitué d'un noyau paléozoïque d'âge dévonien recoupé d'un pluton granitique tardi-hercynien (granite des Béni Snassen). Le noyau est recouvert en discordance majeure par des assises triasiques et jurassiques. Le versant nord de la chaîne correspond à des retombées normales des couches jurassiques qui s'enfoncent sous la plaine des Triffa. La retombée méridionale est plus compliquée avec l'existence d'anticlinaux secondaires (Ain Sfa et Béni Moussi Roua).

Les Béni Snassen occidentaux présentent une homogénéité dans leur série stratigraphique avec des terrains du Jurassique supérieur peu faillés et sub-horizontaux. Ils se caractérisent par un pendage faible.

Sur le plan tectonique, plusieurs de phases de déformation reliées aux jeux successifs des orogénèses hercyniennes et atlasiques ont affecté les terrains du socle et ceux de la couverture méso-cénozoïque donnant lieu à une variété de structures souples et cassantes (plis et schistosités associées, failles, anticlinaux, synclinaux, etc.)

Les particularités tant lithologique que structurale des Béni Snassen orientaux sont à l'origine du choix de notre zone d'étude dont l'extension spatiale est encadrée par les deux bassins versants de Zegzel et de Béni Ouaklane.

La colonne lithostratigraphique y présente les successions de cinq grands ensembles qui sont



D'après cartes géologiques 1/ 50 000 de Berkane et Ahfir du (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie 2001, 2004)

Figure 1.11 : Carte géologique synthétique des deux bassins versants étudiés (Zegzel et Béni Ouaklane).

du bas vers le haut :

- (i) un socle paléozoïque formé d'une série flyschœide d'âge dévonien (schistes et grès) localement recoupée de pluton granitique tradi-hercynien ;
- (ii) une épaisse série triasique (conglomérats de base, argilites rouges à passées gypsifères, et coulées basaltiques) ;
- (iii) une assise jurassique essentiellement carbonatée (dolomies, calcaires, grès et marnes) ;
- (iv) les formations du Néogène à caractère détritique (conglomérats, marnes et grès) et
- (v) les formations superficielles du Quaternaires (croûtes, travertins et dépôts détritiques).

L'existence de formations jurassiques carbonatées (calcaires et dolomies) dominantes, très fracturées, a favorisé le développement de structures karstiques variées constituant les principaux réservoirs en eaux souterraines de la chaîne des Beni Snassen. Les terrains triasiques, avec leurs argilites rouges et coulées basaltiques, constituent le substratum imperméable des aquifères karstiques. Les conditions lithologiques et structurales jouent un rôle important dans la répartition et l'importance de formes géomorphologiques karstiques dont l'étude est développée ci-dessous (paragraphe 1.2).

1.2. MORPHOLOGIE KARSTIQUE, FORMES ET FORMATIONS SUPERFICIELLES

L'objectif de cette partie est de caractériser les morphologies karstiques ainsi que les dépôts karstiques superficiels. En effet, ces formes et ces formations, conditionnent largement les modalités de l'infiltration dans la zone d'étude et il convenait de les identifier et de les décrire sur l'ensemble de la zone d'étude.

La zone d'étude est constituée essentiellement de terrains calcaires très fracturés, à l'exception de la boutonnière Paléozoïque. Cette particularité lithologique explique l'abondance des formes de dissolution superficielles et souterraines.

L'étude des formes géomorphologiques karstiques, permet d'identifier deux grands ensembles d'infiltration. L'infiltration diffuse au niveau des lapiés et des champs de pierres et l'infiltration concentrée guidée par les dolines et les avens. Le mode, la nature et le temps de l'infiltration influencent la vulnérabilité des eaux karstiques.

Ces formes de surface sont connectées à un réseau souterrain bien développé. Les sources, les grottes et les formations travertineuses sont des indices de l'existence d'un karst avec une structure interne bien organisée.

L'influence de la géologie sur l'infiltration est indiscutable. Pratiquement tous les travaux qui traitent des karsts mettent en évidence, plus au moins, le rôle joué par les facteurs géologiques pour leur mise en place, leur évolution et leur fonctionnement. Plus les facteurs géologiques sont favorables à une karstification développée, plus le karst est organisé et bien structuré (CHOPPY, 2008).

Les caractéristiques lithologiques et structurales, du terrain d'étude, commandent la mise en place et l'évolution des formes karstiques et par ce biais favorisent l'infiltration.

La variation de la porosité et de la composition lithologique, la présence des niveaux imperméables ainsi que l'épaisseur de la série karstifiable au dessus de ces niveaux, expliquent en partie les différences de modalité d'infiltration.

La porosité est constituée par l'existence au sein de la roche d'un certain nombre de vides. Ceux-ci peuvent être parfaitement isolés les uns des autres, ce qui interdit toute circulation de l'eau. Par contre si ces pores sont interconnectés la pénétration de l'eau est possible, et comme celle-ci peut dissoudre, elle agrandit peu à peu les fissures.

Le degré d'importance de ces vides, conditionne le mode et la vitesse d'infiltration des eaux de surface. Les dépôts et formations superficielles (éboulis, dépôts de pente, dépôts de terrasses) contrôlent également l'infiltration et le ruissellement des eaux de pluies.

Dans cette partie, nous proposons de faire une analyse géomorphologique. Cette étude comprend trois grands structures : (i) morphologie karstique, (ii) dépôts et formations superficielles et (iii) dynamique actuelle.

1. Morphologie karstique

Le calcaire est une roche peu perméable, mais c'est une roche compacte qui se fissure, par voie de conséquence, l'infiltration se produit au niveau des zones de faiblesse de cette roche qui sont les fissures et les fracturations. Ces zones sont également exploitées par la dissolution qui agrandit les vides, permettant ainsi l'infiltration de l'eau.

1.1 L'infiltration et les formes exokarstiques

Les formes exokarstiques correspondent aux zones privilégiées d'infiltration puisqu'elles résultent du travail de dissolution de l'eau. Le mode d'infiltration (concentré ou diffus) dépend de ces morphologies de surface.

Dans cette partie nous allons définir le mode d'infiltration, pour chaque grand type de formes exokarstiques, rencontré sur la zone d'étude (figure 1.12).

Les formes mineures de surface

Les lapiés

Pour les lapiés, l'eau s'infiltré dans les rainures qui sont des diaclases agrandies par la dissolution. Cette infiltration est donc relativement diffuse. Elle est lente, car la circulation de l'eau se trouve ralentie au fond des diaclases qui deviennent plus étroites en profondeur.

Les lapiés sont bien développés dans le terrain d'étude, couvrent de vastes surfaces et à différentes altitudes (voir carte géomorphologique). Ceci témoigne de l'évolution du karst de surface.

Typologie des lapiés

Les lapiés sont essentiellement développés sur les calcaires dolomitiques. Ils se répartissent sous différents types :

Les lapiés de ruissellement

Ce sont des lapiés formés à l'air libre, sur la roche nue, ce type de lapiés est formé par la dissolution directe de l'eau de pluie. Ils sont observés là où la pente est suffisamment forte pour favoriser un ruissellement rapide de l'eau (photo 1.5). Nous les rencontrons dans les endroits où la

Photo 1.5 : Quelques illustration des lapiés de ruissellement.



dissolution karstique est favorable.

En effet, ils sont répandus dans tout l'ensemble du massif des Béni Snassen. On note un grand nombre des lapiés sur les surfaces des calcaires dolomitiques du versant est de Jbel Imaroufène, versant nord des jbel Tichouchay et Bel Ayyane et au versant sud de jbel Ighermawene.












































Les lapiés de crypto-corrosion

Ce sont des lapiés de formes arrondies développés sous couverture. L'existence passée, d'une couverture jouant le rôle d'une compresse humide sur les formations karstifiables a donné naissance à ce type de formes de dissolution probablement produites par l'activité racinaire des végétaux (photo 1.6). L'existence de ces formes est un témoignage de la dégradation de la couverture biopédologique.

Ce type de lapiés est assez fréquent sur la partie sommitale des jbel Tammjout, Bel Ayyane, Maroufene et Arhil.

Photo 1.6 : Illustration des lapiés de crypto-corrosion (Arhil Nyaala).



Formations	
	Quaternaire
	Tithonien : Calcaire, grès, marne
	Kimméridgien : Calcaire et dolomie massive, alternance marno-calcaires
	Oxfordien : Grès à intercalations marneuses, calcaires
	Bajocien-Callovien : Dalle calcaire à Zoophycos
	Toarcien : Alternance de marne feuilletée et de calcaire
	Domérien : Alternance marno-calcaire
	Carixien : Alternance marno-calcaire souvent à silex
	Héttangien-Sinumérien : Calcaire et dolomie
	Trias : Argile, conglomérats et coulées basaltiques
	Monzogranite hercynien
	Schistes micacés
	Dévonien : (Schiste, Quartzite...)
	Travertins
	Dépôt de pente
Tectonique	
	Failles
	Axe synclinal
	Axe anticlinal
	Pente
Formes structurales	
	Surface structurale
	Chevron
	Escarpement
	Corniche rocheuse
	Versant convexe
	Talus
Eboulis/Glacis	
	Glacis caillouteux
	Cône d'éboulis
	Versant régularisé
	Eboulis de versants
Formes fluviatiles	
	Vallée en V
	Vallée en U
	Vallée en berceau
	Rebord terrasse
	Versant vallée
	Ravin
	Niche de solifluxion
Formes karstiques	
	Grotte
	Lapiaz
	Doline
	Gouffre
	Bassin perché
Topographie	
	Source perenne/temporaire
	Point coté

Légende de la carte géomorphologique.

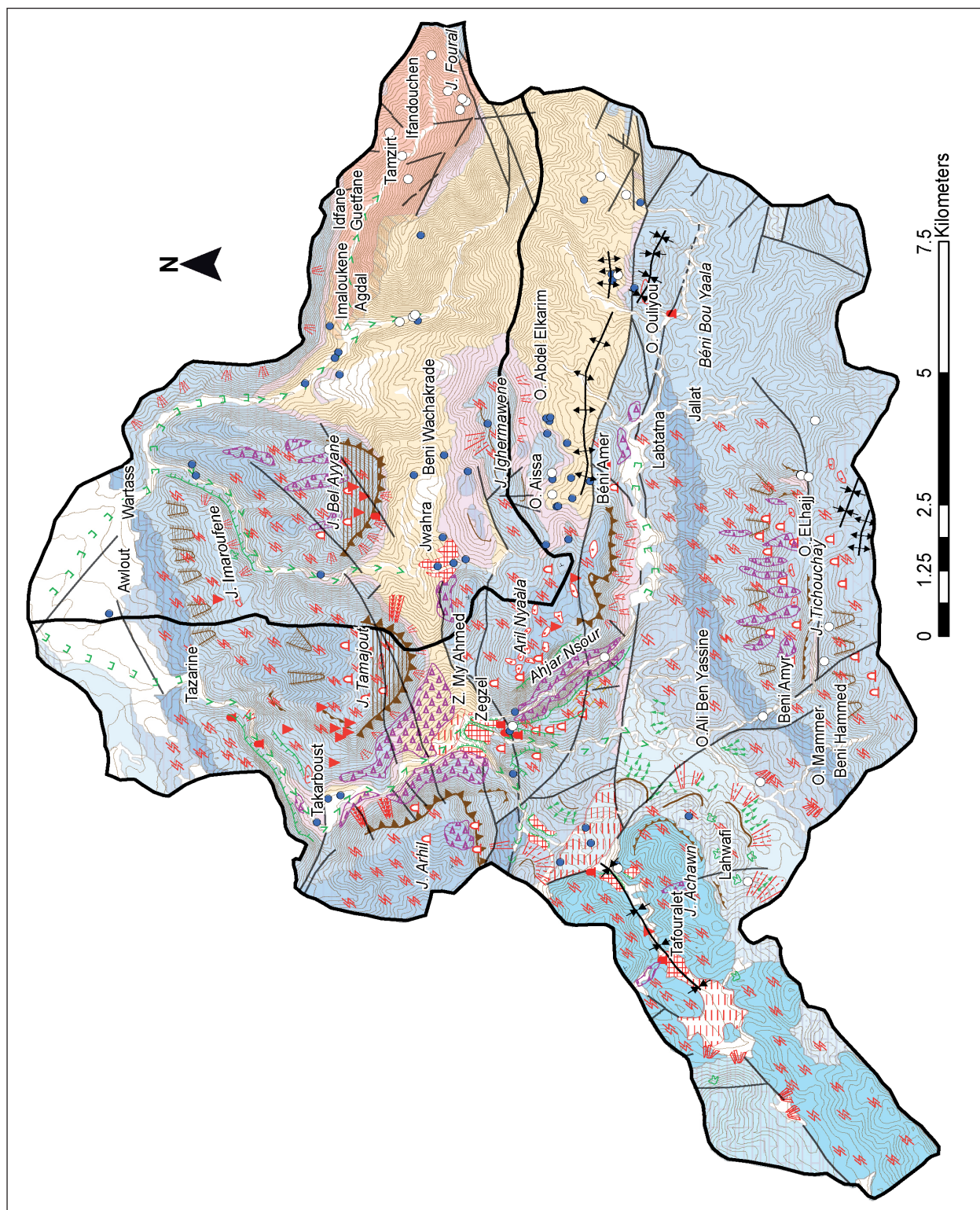


Figure 1.12 : Carte géomorphologique des deux bassins versants Zegzel et Beni Ouaklane.

Les « champs de pierres »

La fracturation tectonique entraîne une désagrégation mécanique des lapiés, donnant naissance aux « champs de pierres ». Ils marquent un stade de vieillesse des lapiés de fissures et des parois ruiniformes (photo 1.7). Ces formes sont observées sur le versant tourné vers le nord de jbel Tichouchay, Achawn et Ahjar Nsour.

Photo 1.7 : Champs de pierres (Ouled Ouliyou).



Les formes majeures superficielles

Les dolines

Les dolines peuvent être considérées comme des réceptacles des précipitations. Se sont des zones d'absorption, car l'eau s'infiltre au fond de ces cuvettes par un point d'infiltration. Nous considérons donc qu'à l'échelle de ces formes, l'infiltration est concentrée.

Du point de vue géomorphologique, les dolines constituent les formes superficielles majeures par leurs dimensions et par leurs caractéristiques d'infiltration. Nous distinguons trois principaux champs de doline :

Le premier groupe de dolines est limité par jbel Tamajout vers le sud, et jbel Tichouchay vers le Nord. Ces dolines sont alignées, selon un réseau de failles (cf. carte géomorphologique, figure 1.12).

A Aril Nyaàla, un deuxième champ de dolines est situé à partir de 1 000 m d'altitude, les dolines sont disposées non loin du front de chevauchement de direction N.W-S.E (photo 1.8) (cf. carte géomorphologique, figure 1.12).

Le troisième champ de dolines se situe à 570 m d'altitude de jbel Imaroufène. Cependant, c'est une basse altitude par rapport aux autres champs (cf. carte géomorphologique).

1.2. L'infiltration et les formes endokarstiques

Les données utilisées pour l'étude de cette forme, se basent sur le terrain et les travaux de CAMUS *et al* (1981)

Les avens constituent une des formes privilégiées d'infiltration des eaux de surface. Lors des pluies le réseau hydrographique s'écoule à travers l'ouverture d'aven en surface. Ceci donne une

Photo 1.8 : Doline végétalisée avec un caractère émoussé des calcaires bordant la dépression (Arhil Nyaala).

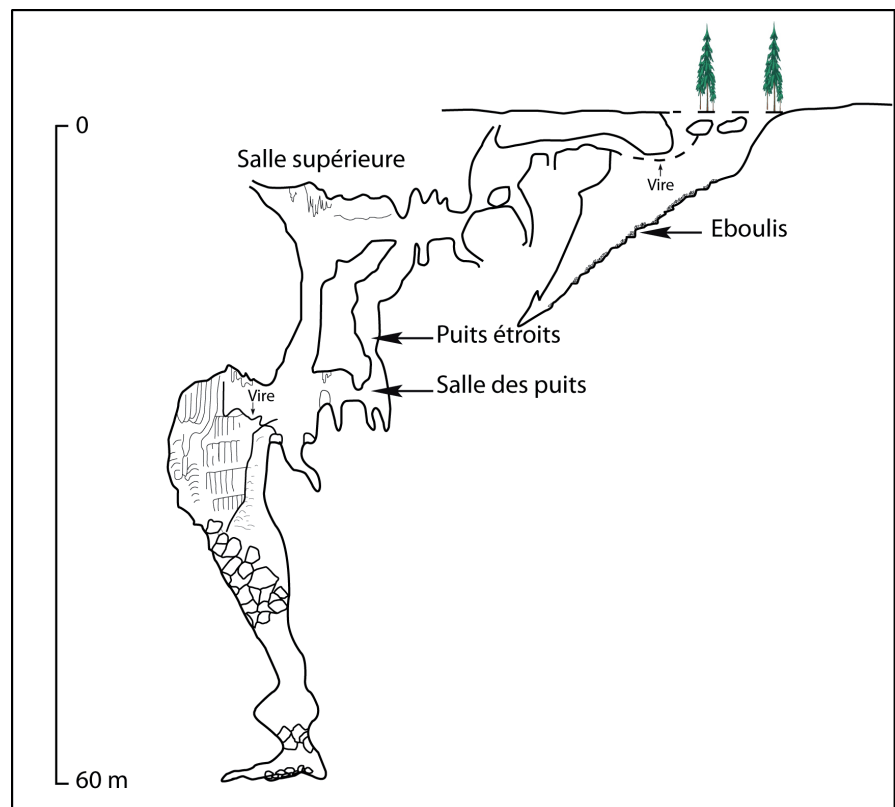


infiltration concentrée.

Les avens rencontrés sur le terrain sont variés du point de vue géomorphologique et topographique. Ils sont essentiellement développés dans les roches calcaréo-dolomitiques (cf. carte géomorphologique).

Dans le présent travail, nous donnons l'exemple de l'aven exploré: aven de Takerboust. L'entrée du gouffre est de 20 m de large environ, elle donne sur une salle très inclinée. Il présente différentes salles et galeries très concrétionnées et une succession de puits. 60 m ont été explorés en 1981 par CAMUS *et al* (figure 1.13).

Figure 1.13 : Aven de Takerboust.



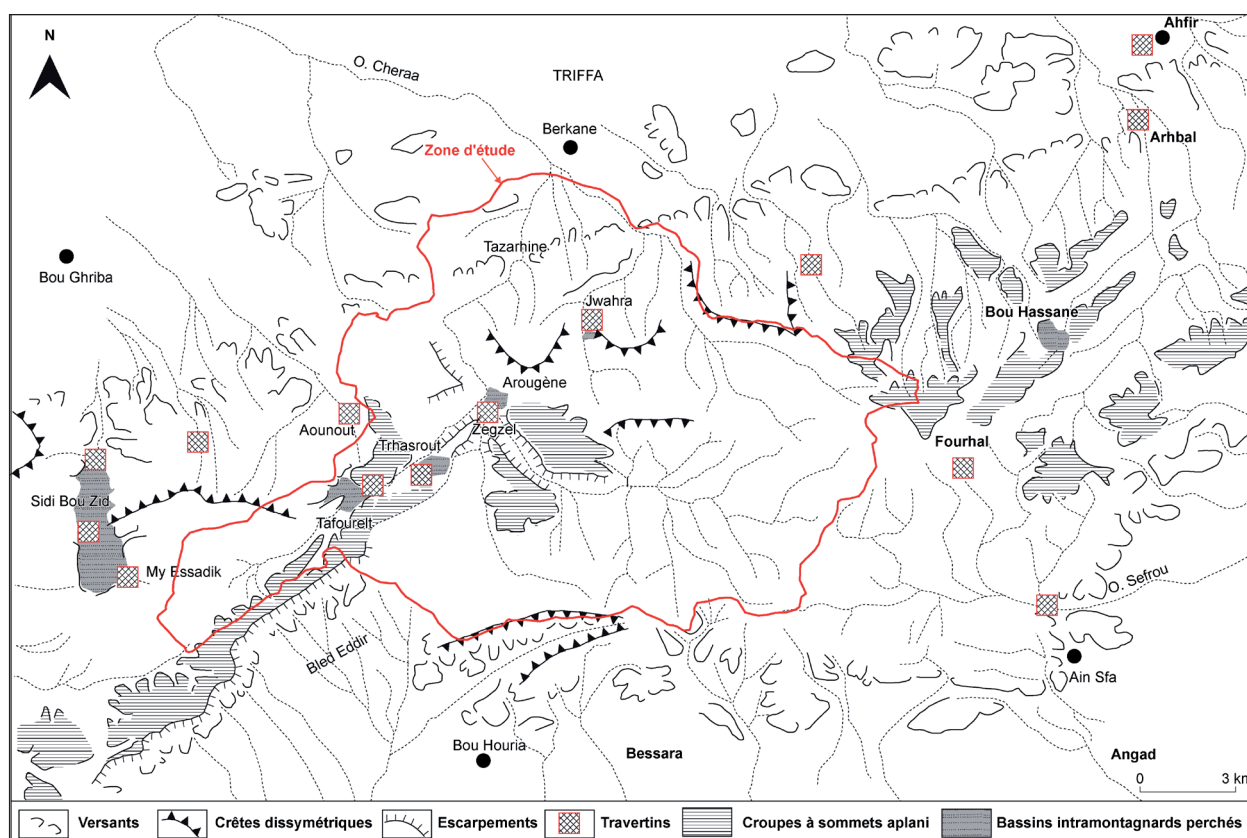
(CAMUS *et al.*, 1981)

Il existe un nombre remarquable d'avens, de différentes dimensions (photo 1-6). Ces formations sont généralement quasi-comblées par l'homme pour prévenir des risques de chutes d'animaux.

Le manque de données concernant l'organisation du réseau souterrain (la connexion des points d'entrées et des points de sorties des eaux de pluies), empêche de suivre le cheminement des eaux de pluies de l'impluvium jusqu'à l'exutoire.

Bassins perchés et accumulations travertineuses

Les bassins perchés des Béni Snassen sont des dépressions à fond plat généralement sculptés dans les bancs calcaréo-dolomitiques. Ces bassins sont ouverts vers l'aval grâce à l'érosion régressive des oueds. Les travertins sont toujours réentailés en gorge raccordant le bassin perché et le réseau fluvial d'aval. Ils se localisent toujours sur la rupture topographique. Ils doivent leur ampleur au caractère brutal de cette rupture entre un amont à écoulement calme et un tronçon aval raide et accidenté. Dans les Béni Snassen nous pouvons citer les bassins perchés suivants : Sidi Bou Zid, Moulay Essadik, Tafouralet, Trhasrout, Arougène, etc. (figure 1.14). Dans le cadre de ce travail, nous nous focalisons sur les travertins localisés dans la zone d'étude.



Source : (LAQUINA, 1987b)

Figure 1.14 : Carte de localisation des sites travertineux

Le bassin de Tafouralet

Le bassin de Tafouralet est une haute surface à topographie plane recouverte de dépôts récents et de sols profonds d'apport alluvial (BOUMEAZA, 1985). L'extrémité aval du bassin est occupée par des accumulations travertineuses d'une trentaine de mètre d'épaisseur (figure 1.15). Ces travertins fossilisent des conglomérats à ciment calcaire fortement diagénétisé (MEZRHAB, 1994).

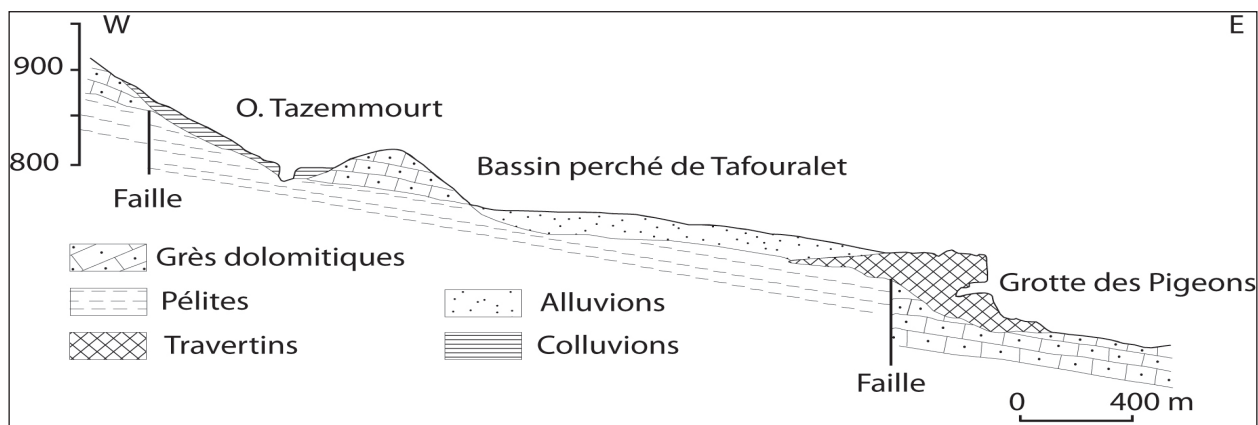


Figure 1.15 : Coupe du bassin perché de Tafouralet.

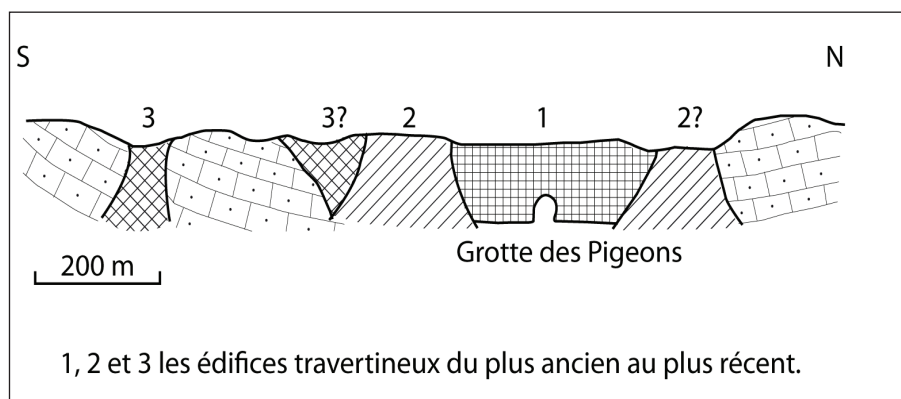


Photo 1.9 : Le bassin perché de Tafouralet

Ces travertins sont des tufs poreux à empreintes de végétaux : feuilles, tiges, mousses et des travertins rubanés stromatoléthiques (photo 1.10). L'importance de ces accumulations travertineuses semble indiquer que l'époque finie pliocène et villafranchienne fut caractérisée par des phases de karstification très actives (VAUDOUR, 1982).

Le système travertineux de la grotte des Pigeons permet de mettre en évidence au moins trois ensembles travertineux emboîtés les uns dans les autres (MEZRHAB, 1994), le premier ensemble est actuellement en inversion de relief par rapport au deuxième ensemble, ce dernier occupe une position centrale dont les autres ensembles s'emboîtent de part et d'autre (figure 1.16).

Figure 1.16 : Coupe transversale dans les travertins de la grotte des Pigeons.



Source : (MEZRHAB, 1994)

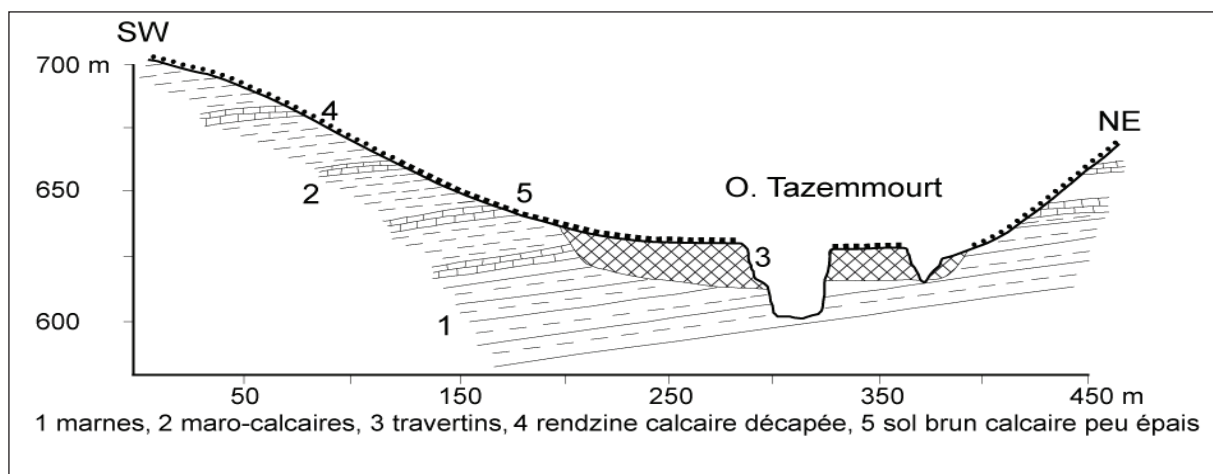
Photo 1.10 : Travertins de la grotte des Pigeons.



Les travertins de la grotte des Pigeons sont des travertins inactifs, constitués d'anciens édifices fortement diagénétisés. La phase de construction d'une formation travertineuse, correspond à des conditions climatiques de température et d'humidité favorables dans laquelle la dissolution des carbonates est prédominante.

Le bassin de Trhasrout

Le bassin perché de Trhasrout est situé à l'est de la faille de Tizi ou Zemmour, il est à une altitude moyenne de 600 m. Le substrat géologique est constitué de marnes et marno-calcaires (figure 1.17). Le bassin correspond d'un point de vue structural à un synclinal (photo 1.11), dont l'axe est légèrement décalé vers le sud. Le fond de la dépression est comblé d'importantes accumulations de travertins de plus de 25 m (BOUMEAZA, 1985), de conglomérats calcaires : croûtes mortadelles, de calcaire saumon.



Source : (BOUMEAZA 1985)

Figure 1.17 : Coupe à travers l'oued Tazemmourt à Tizi Ou Zemmour dans le bassin perché de Trhasrout.



Photo 1.11 : Le bassin perché de Trhasrout

A la sortie du synclinal perché et Tizi ou Zemmourt, dominant des travertins d'environ 25 m d'épaisseur (BOUMEAZA 1985). Ces accumulations se présentent sous forme d'entablements en gradins fossilisant l'ancien parcours de l'Oued Tazmmourt à environ 20 à 30 m au-dessus du fond du bassin. Ces travertins sont donc postérieurs au creusement et à l'élargissement de la vallée. Ils couvrent une large paléovallée.

Ces dépôts sont coiffés par un mélange de poudingues et gros blocs (photo1.12).



**Photo 1.12 :
Les travertins
du Trhasrout.**

A l'aval l'oued devient très encaissé et coule en gorges assez étroites dominées par des versants riches en éboulis. Ces gorges sont taillées dans les calcaires et dolomies du Lias inférieur et moyen.

Le bassin d'Arougène

Le bassin d'Arougène constitue le bassin de réception le plus large où convergent trois influents de l'oued Zegzel : oued Tazemmourt, oued Moulay Idriss et oued Ferrouj (photo 1.13). Ce bassin est bâti sur une combe anticlinale. Dans ce bassin affleurent des schistes paléozoïques, des basaltes triasiques, des calcaires et des dolomies du Lias inférieur et moyen. Le point de confluence est caractérisé par un gradin travertineux, d'âge inconnu, de près de 50 m d'épaisseur. Il forme un fond plat dont la surface est remaniée par des conglomérats épais de 50 cm. Ce bassin est réentaillé sur ces bords par des oueds qui y débouchent.



Photo 1.13 : Le bassin perché d'Arougène.

Les travertins sont en rapport avec les sources karstiques de Zegzel et la grotte du Chameau. Les accumulations ne se produisent pas directement aux sources, elles se situent à environ 300 m. L'agitation de l'eau permet le dégazage du CO_2 équilibrant.

D'un point de vue stratigraphique, il s'agit d'un système composé de plusieurs ensembles travertineux emboîtés les uns dans les autres (BOUMEAZA, 1985). L'accumulation de ces travertins est postérieure au creusement et à l'élargissement du bassin.

Photo 1.14 : Détail des travertins d'Arougène.



Le bassin Jwahra

La dépression perchée de Jwahra est barrée, au dessus de la profonde vallée d'Ouartass par un gradin travertineux de taille modeste (photo 1.15). Ces accumulations dominent la partie moyenne du versant sud de jbel Belaine.

Photo 1.15 : le bassin perché Jwahra.



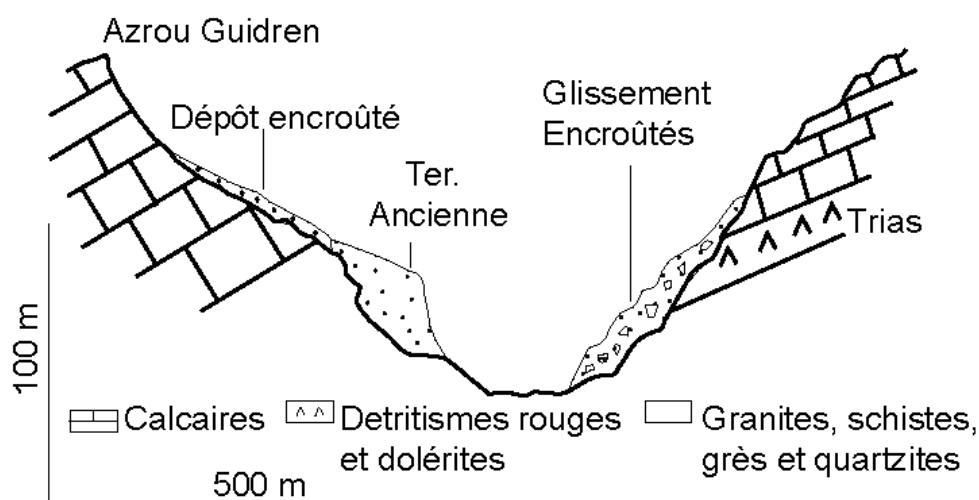
Plusieurs critères différencient les bassins perchés abordés : leurs altitudes, leurs positions structurales, leurs formes et leurs tailles. Une caractéristique fondamentale les unit, c'est leur situation perchée par rapport au réseau hydrographique qui s'encaisse immédiatement à leurs pieds.

Les facteurs fondamentaux qui agissent dans la nature des formes et dépôts du Villafranchien sont la nature du substrat et de la topographie des reliefs amonts : les travertins des bassins perchés en montagne représentent une fixation locale des carbonates provenant de la dissolution des massifs calcaires ; des dépôts qui représentent le remaniement de sols rouges d'une part, et des formations rocheuses d'autre part. Des calcaires et des travertins résultent de la précipitation de carbonates dans des lacs ou à l'aval des sources.

Les accumulations travertineuses témoignent d'une karstification majeure dans les Béni Snassen Orientaux. Ces accumulations sont localisées à proximité des oueds et elles sont raccordées aux sources karstiques. L'âge des travertins évoqués dans ce travail n'a fait l'objet d'aucune étude. Dans son travail de thèse, Mezrhah a daté les travertins situés dans les Béni Snassen occidentaux (Sidi Bou Zid) dont l'âge a été estimé à 1,5 million d'années (MEZRHAB, 1994).

1.3 Les gorges

Le massif carbonaté des Béni Snassen présente un paysage dans lequel l'eau est l'agent essentiel dans les processus de l'érosion. En effet, les oueds du massif des Béni Snassen mettent en avant l'enfoncement des gorges dans les assises calcaires et dolomitiques. Généralement les planchers des oueds sont nus, sculptés par des marmites qui sont recouvertes par une mince pellicule alluviale. Les grands escarpements à colluvions ordonnés, régularisant une partie des versants : l'ampleur topographique des escarpements, l'épaisseur des couches dures liasiques en corniches et la longueur du versant recoupant les formations plus tendres du Paléozoïque et du Trias, sont responsables de ce modelé (figure 1.17). La régularisation des versants n'est pas totale, les corniches calcaires (Lias inférieur dolomitiques) s'individualisent nettement au dessus d'un plan régularisé de pente moyenne, entaillée plus bas, dans les schistes.



Source : (LAOUINA, 1987b)

Figure 1.18 : Variation des dépôts selon la topographie dans les versants des gorges de Zegzel.

La majorité des cours d'eau du massif des Béni Snassen sont encaissés. Avant de s'ouvrir sur le piémont, les oueds Zegzel, Béni Ouaklane, Quartass entaillent profondément le manteau liasique et mettent à nu le socle Paléozoïque (schistes et granites).

Par endroit les versants du massif des Béni Snassen sont couverts par des dépôts. Ces derniers ont des épaisseurs et des natures variables selon leur localisation topographique et le substrat qui les portent.

1.4 Dépôts et formations superficielles

Les croûtes calcaires

Les croûtes calcaires constituent souvent une formation superficielle dans les régions arides et semi-arides, elles sont définies comme une accumulation calcaire très dure, peu développée (décimétrique) (DURAND *et al.*, 1979). Elles sont fréquentes dans le massif des Béni Snassen (GHAZI, 1987; LAOUINA, 1987b; MEZRHAB, 1994, 2007; RUELLAN, 1971). Les encroûtements sont différents d'un endroit à un autre. La variation dépend de la rigueur du relief, de la nature lithologique des assises et des conditions bioclimatiques. Il est possible de distinguer trois aspects :

- 1- encroûtements faiblement épais formés localement sur des substrats paléozoïques,
- 2- encroûtements relativement importants jouant un rôle de régulateur de versants sur les assises marneux et marno-calcaires, dans lesquelles l'infiltration des eaux est faible ;
- 3- encroûtements calcaires fossilisant les faibles pentes et les surfaces aplanies, dans lesquelles la karstification est limitée.

L'encroûtement est rare à absent sur les terrains karstifiables à fortes pentes.

Les dépôts de pente

Ce sont les dépôts les plus répandus dans la zone d'étude. Ils couvrent les versants de l'oued My Idriss. Il s'agit d'un dépôt à matrice fine très abondante riche de fragment de calcaire dolomitique de dimension centimétrique. Cette fragmentation tapisse tout le versant sud ouest du jbel Tamajout. Ces dépôts sont mal consolidés ce qui provoque leur ravinement par endroit. Ce dépôt peut être observé le long de la route d'Ain Almou passant par oued Bou Zaabel. Elle caractérise aussi le versant sud de jbel Béni Ouaklane à douar Ajdir. Ces dépôts proviennent d'un environnement lithologique qui a subi une longue phase de désagrégation.

Les dépôts de cailloutis

C'est une couverture de débris épais, avec une grande abondance des matériaux grossiers. Ces dépôts comprennent deux types :

1. Dépôt à cailloutis abondants, ils sont de taille décimétrique avec une faible proportion de gros blocs. Ce type de dépôt peu être observé à proximité de la grotte du Chameau près de Takarboust, Oulyou, Maaroufène et Ajdir. Ce sont des dépôts de cailloutis encroûtés et consolidés par une matrice de couleur beige.
2. Blocs d'origine calcaire de taille plus grande que le précédent dépôt. ils sont associés

à des cailloutis décimétriques. Ces dépôts sont observés sur le versant sud d'Azrou Guidren (photo 1.16). Ils surmontent la terrasse à l'aval de Tazarhine et le versant est de jbel Bel Ayyane. Le dépôt est surmonté par une mince croûte calcaire.

L'existence de ce dépôt témoigne d'une désagrégation intense de la roche en place sous un climat plus humide que l'actuel, lors d'une phase bioclimatique très favorable.

Photo 1.16 : Dépôts de blocs métriques associés à des blocs décimétriques (versant est du jbel Azou Guidren).



Les éboulis

Les crêtes calcaréo-dolomitiques dominent des versants généralement à forte pente, tapissés par un matériau caillouteux provenant des crêtes. Ces formations sont des dépôts de gravité, des éboulis diversifiés selon la consolidation et l'épaisseur des matériaux (figure 1.19).

Les éboulis anciens très consolidés

Ils se présentent sous forme de « grèzes » périglaciaires témoignant des phases froides du quaternaire ancien. Ils sont limités dans l'espace. Ils se localisent au pied de la crête de Tamejout. Un ciment calcaire rose saumon à pellicule rubanée consolide des cailloux anguleux ne dépassant pas 30 cm de diamètre. Au-dessous de cet horizon, la densité des cailloux devient plus importante que celle de la matrice. En dessous il y a une formation caillouteuse consolidée à matrice calcaire. L'épaisseur du dépôt varie entre 2 et 4 m.

La gélifraction des roches calcaires dolomitiques est à l'origine de ces dépôts vu la forme angulaire des cailloux.

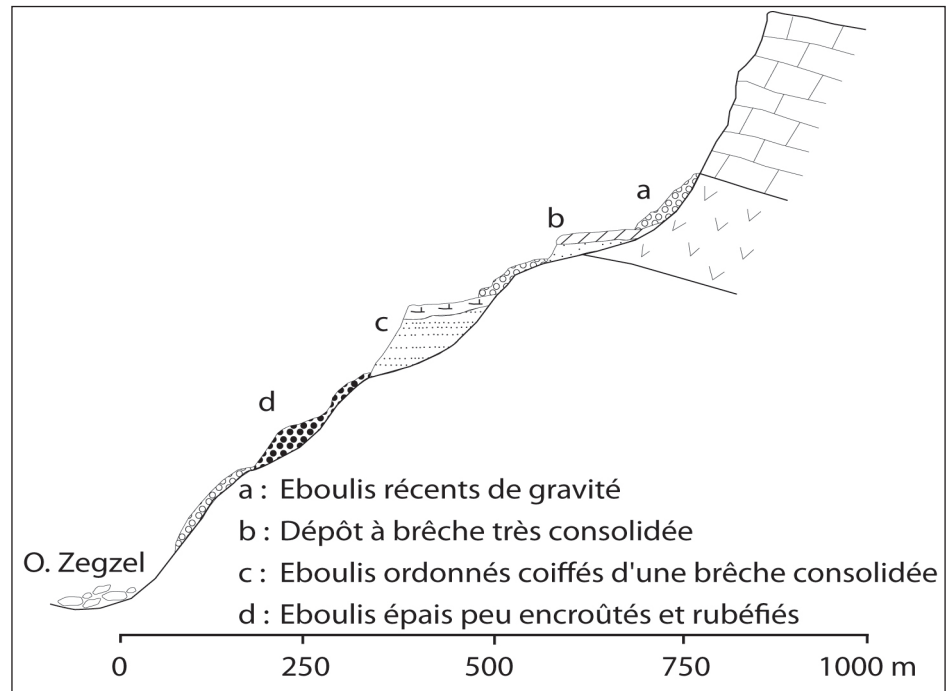
Les éboulis à brèche sommitale fossilisant des éboulis ordonnés

Il s'agit d'une accumulation caillouteuse dont les éléments s'ordonnent d'une manière plus régulière que dans les éboulis ordinaires ou de gravité.

Ce sont des fragments plats, anguleux de taille plus ou moins variée. Ces accumulations sont observées à 800 mètres d'altitude sur le versant est de jbel Israne, à 760 m à Beni Amyr. A

Figure 1.19 : Coupe schématique des dépôts de pente du jbel Tamejout.

NB. Echelle verticale très délitée.



Source : (LAOUINA 1987b)

Tafouralet à 800 m d'altitude, elle épouse la concavité d'un ancien vallon en berceau. Ces éboulis sont présents également sur le versant de Tamejout, Arhil et Azrou Guidren.

Sur le versant de jbel Tamejout l'épaisseur de ces dépôts dépasse 5 à 7 m dans certains endroits (BOUMEAZA, 1985). Ces dépôts sont coiffés par une brèche sommitale consolidée à ciment rose reposant sur une formation moins encroûtées, englobant des cailloux subanguleux avec des passés de lits de pierrailles riches en matrice limono-argilo-sableuses intercalée dans des formations caillouteuses.

Sur les versants d'Arhil et Azrou Guidren l'épaisseur est moins importante que celle de jbel Tamejout. A Arhil, ces dépôts sont parfois colmatés par des éboulis récents : les cônes d'éboulis et les éboulis en tabliers.

Les éboulis récents peu encroûtés

Les éboulis en tabliers

Ils sont très présents et concernent la plupart des versants. Leur étendue et leur épaisseur dépendent de conditions structurales et topographiques des assises qui les alimente et sur lesquelles ils reposent.

Ils sont présents d'une manière discontinue sur le versant du jbel Tamejout ainsi que sur le versant du jbel Ouaklane. Sur le versant du jbel Arhil l'épaisseur de ces éboulis augmente à proximité de Takerboust.

Les cônes d'éboulis

Ils sont très limités dans l'espace. Ils apparaissent sur jbel Arhil, peu sur jbel Tamejout et dans la section moyenne de l'Oued Zegzel situé entre Takerboust et Tazarine où la vallée est en gorge.

Ces éboulis sont caractérisés par leur canalisation en couloir dans les ravins. Les éléments qui les composent sont hétérogènes, libres et sans matrice (photo 1.17).

Photo 1.17 : Cône d'éboulis dans le versant sud de jbel Tamejout.



Les Glacis

On distingue deux types de glacis attachés aux versants du synclinal de Tafouralet :

Glacis cône à cailloutis de Metchich

Ce glacis est de faible dimension et très caillouteux. Cet apport de charge grossière caillouteuse, de faible dimension et très caillouteuse est assuré par les vallons et les talwegs qui descendent le long de ce versant. Son épaisseur peut atteindre 1.50 m à l'aval (BOUMEAZA, 1985), où il s'emboîte dans les formations alluviales de l'oued Tazemmourt. La matrice est hétérogène et les cailloux très hétérométriques (métrique à décimétrique).

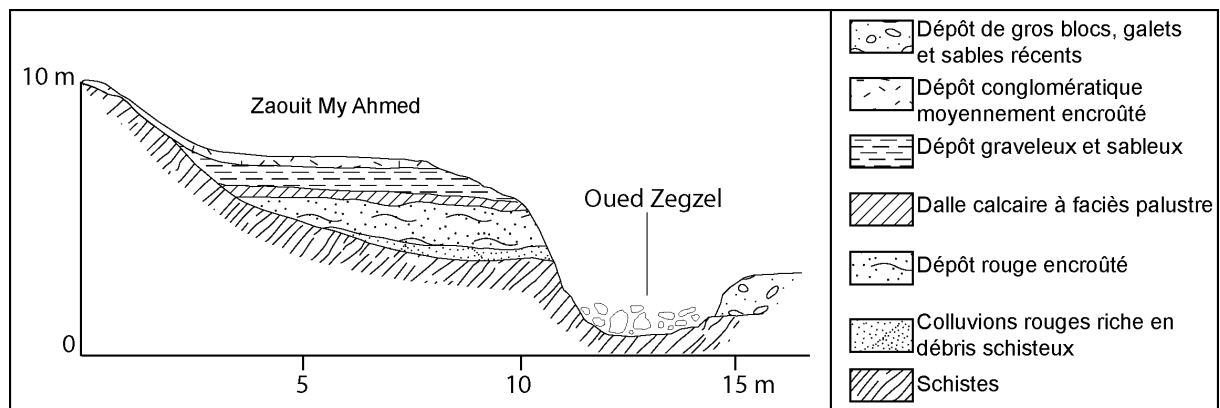
Glacis des versants de raccordement

En bas des versants de Metchich à l'est, et de jbel Islane ou Lahmar au nord, les formes d'accumulation favorisent l'évolution des glacis de versants de petite dimension. Ces formations sont constituées de matériel hétérogène à dominante argilo-limoneuse et caillouteuse.

Les formations alluviales

Dépôts de terrasses de Moulay Ahmed

Situé à 200 m d'altitude à l'aval du promontoire travertineux, ces dépôts de terrasses ne subsistent que sur la rive gauche de l'oued Zegzel. Dominant par un talus, le lit actuel est situé à près de 3 m. Sur la rive droite des dépôts récents bien régularisés viennent fossiliser l'ancien lit majeur couvert actuellement de blocs, galets et graviers sableux recouverts de limons gris épais de 40 cm (BOUMEAZA, 1985). La figure 1.20, montre également l'emboîtement des dépôts de la terrasse de la rive gauche de Zaouit My Ahmed.

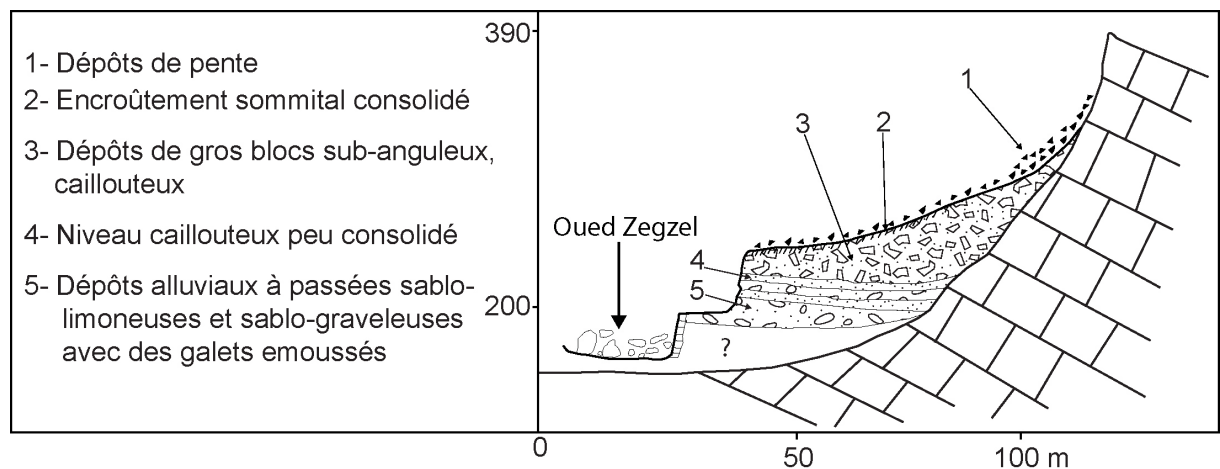


Source : (BOUMEAZA, 1985)

Figure 1.20 : Dépôt de terrasse à Zaouit My Ahmed à l'aval du promontoire travertineux d'Arougène.

La section aval entre Takerboust et Tazarhine

Entre Takerboust et Tazarhine, l'oued Zegzel est un cours cataclinal qui encaisse les basaltes et les schistes. Cette section est caractérisée par des gorges et des parois raides. Sur les versants au pied desquels l'oued coule en méandres, des dépôts de pente à matrice rouge et encroûtée jonchent ces bas de pente et fossilisent les alluvions (figure 1.21).



Source : (BOUMEAZA, 1985)

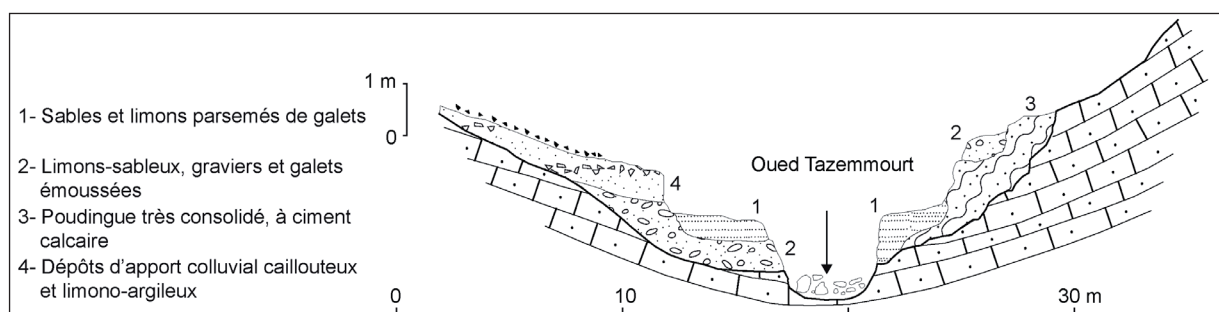
Figure 1.21 : Fossilisation des alluvions par des colluvions sur les berges de l'oued Zegzel (Tazarhine).

Terrasses alluviales de l'oued Tazemmourt

Les terrasses alluviales de l'oued Tazemmourt sont essentiellement localisées à l'aval du débouché de Trasrhout. Les dépôts les plus anciens sont localisés à l'aval de la grotte des Pigeons. Leurs largeurs ne dépassent pas 10 m (BOUMEAZA, 1985). Les dépôts récents sont absents sur cette section.

Les faciès sédimentaires présentent une grande variation entre l'amont et l'aval. L'amont ne comporte que de petites terrasses limoneuses, sableuses et caillouteuses très dégradées. En aval de la grotte des Pigeons, les dépôts les plus significatifs montrent une structure différente par rapport aux deux rives. La figure 1.22 témoigne de l'existence de phase de creusement et d'alluvionnement

après le dépôt du niveau 3.



Source : (BOUMEAZA, 1985)

Figure 1.22 : Emboîtement des dépôts de terrasses à l'aval de la grotte des Pigeons (oued Tazemmourt)

Les dépôts du fond des oueds

Les dépôts du fond des oueds sont caractérisés par une grande variabilité de taille. La raideur de la pente favorise le glissement des blocs issus des escarpements très fracturés. L'érosion des sols provoque le transport de matériaux plus fins (argile et limon). Ce dernier type de dépôt est local. La matière en suspension est déposée plus en plaine à cause de l'importance des flux torrentiels.

La composition pétrographique des dépôts est variable d'un oued à un autre. Elle est intimement liée à la nature lithologique de bassin versant des oueds (tableau 1.1).

Le déplacement de matériaux volumineux explique l'intensité de l'érosion mécanique et de la dynamique fluviale. Le transport de matières fines laisse supposer un cheminement à travers le karst via les pertes au fond des oueds. Pour confirmer cette hypothèse, nous avons croisé les dépôts de l'oued Ferrouj et Moulay Idris avec les dépôts sédimentaires de l'étage inférieur de la grotte du Chameau (tableau 1.1) (cf. chapitre chapitre 5).

Localisation	composition
Oued Ferrouj	Riche en morceaux de lias schisteux, quelques morceaux de quartz, beaucoup de calcaire, un peu d'oxydes de fer, grès du Trias
Oued Moulay Idris	Très riche en schistes, quartz et calcaires
Oued Béni Ouaklane	Riche en granites et schistes, quelques morceaux de calcaires
Etage inférieur « grotte du Chameau » (zone noyée)	Schistes, quartz, micas blancs très visibles, oxydes de fer, peu de calcite.
Etage inférieur « grotte du Chameau » (Pas d'eau à proximité de 20 m)	Schistes, grès du Trias, quartz, un peu de carbonates
Doline « Arhil Nyaàla »	Schistes, beaucoup de grains de quartz, Fer, argile, sable, Beaucoup d'aplite, un peu de micas, quelques morceaux de racines. L'ensemble n'est pas carbonaté

(mai 2010)

N-B : les données concernant la grotte du Chameau seront exploitées dans le chapitre 5.

Tableau 1.1 : Composition pétrographique des sables de l'oued Ferrouj, Moulay Idris Aril Nyaàla et de la grotte Chameau.

1.5 Les phénomènes de la dynamique actuelle

Pendant les périodes de pluies, nous pouvons observer de multiples formes de ravinement. Nous distinguons des phénomènes généralisés et certains phénomènes à dynamique locale.

L'érosion pluviale

Cette forme d'érosion est généralisée sur tous les versants. Elle se manifeste par les pluies qui agissent mécaniquement sur le sol. La pluie provoque le ravinement de sols dépourvus de toute végétation. Les particules fines de sols sont projetées sous l'effet de l'impact des gouttes d'eau et sont transportées par les écoulements torrentiels. Ces phénomènes se produisent à chaque fois lors des averses violentes.

Le ruissellement diffus

Lorsque l'eau ne s'infiltré pas, de petits chenaux s'approfondissent lorsque la topographie le permet (pente forte). Les ruissellements agissent sur la désagrégation du sol et la libération des particules fines. La capacité du transport et de lavage des versants se traduit par la turbidité des eaux superficielles qui se caractérisent par une coloration ocre pendant les périodes pluvieuses. Les eaux de sources sont également touchées par ce phénomène.

Après les averses, le débit diminue et les chenaux se morcellent pour finir par soit s'infiltrer à travers le karst soit s'évaporer.

Dans les phénomènes de la dynamique localisée on distingue les formes suivantes : les formes de solifluxion et les ravinements.

Les formes de solifluxion

Elles sont fréquentes sous forme de loupes de solifluxion. Elles se manifestent par une ondulation des dépôts de versants généralement argilo-limoneux. Leurs ampleurs dépend de la nature lithologique des terrains et de la topographie. Le déclenchement de ce processus est lié à la saturation des couches sous-jacentes. Ces formations sont très présentes sur les versants de jbel Achaouen et jbel Irharmaoune.

Les ravinements

C'est la forme d'érosion dominante sur les versants dénudés à couverture végétale très dégradée ou sur les versants mis en culture dont les pentes sont fortes : exemple Jwakra (photo 1.18(3)). Ils ont pour origine les chutes brutales de pluies tombant sous forme d'averses violentes, créant des griffures qui se transforment avec la succession des orages aux ravinements (Takerboust et Zegzel photos 1.18 (1 et 2)). Ce type de forme est très répandu dans les formations marneuses d'où les conditions lithologiques associées aux défrichements locaux sont favorables à ce processus (Béni Amyr photo 1.18 (4)).

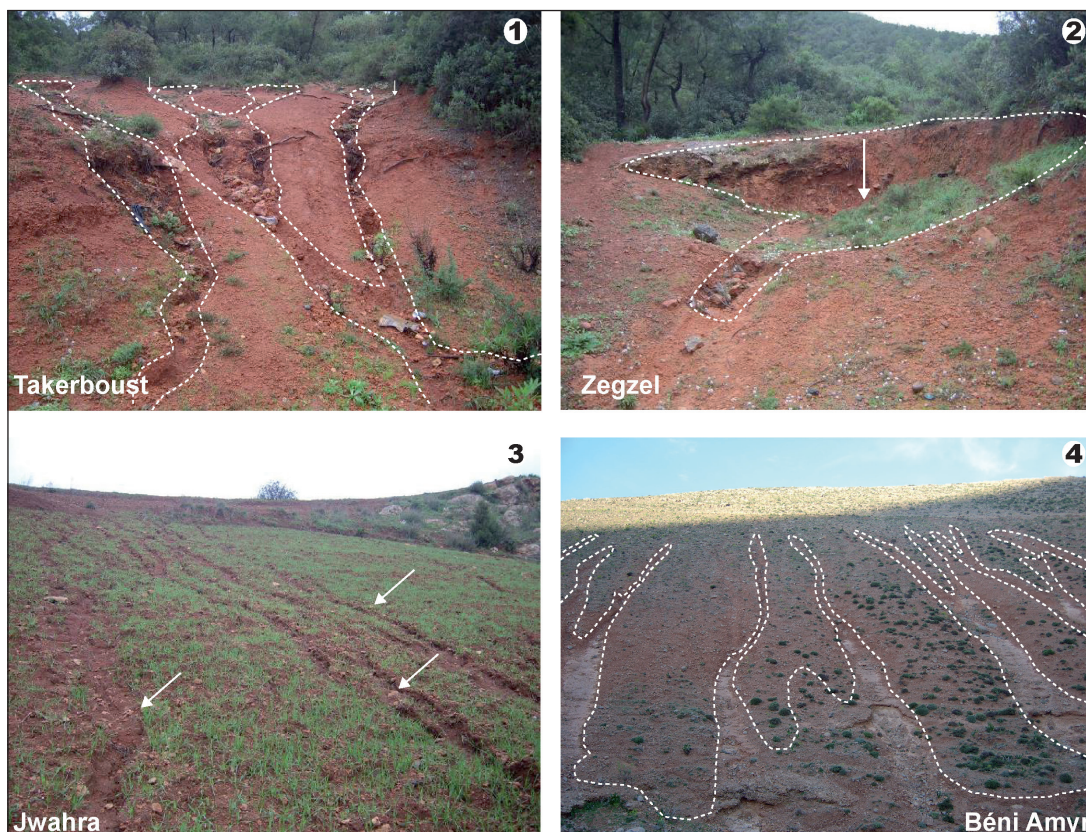


Photo 1.18 : Illustration des phénomènes de ravinement et d'érosion des sols (Béni Snassen orientaux 2008/2009).

Conclusion

Cette présentation a permis de mieux apprécier la répartition des formes et formations géomorphologiques. Dans les Béni Snassen orientaux, les formes karstiques superficielles et souterraines sont variées (lapiés de ruissellement, lapiés de crypto-corrosion, champs de pierres, dolines, aven). Ces formes constituant les points privilégiés d'infiltration des eaux de pluies. Par leur nature et leur développement, elles contrôlent les modalités d'infiltration. L'existence des accumulations travertineuses en aval des sources karstiques et de nombreuses grottes constitue un indice d'une structure endokarstique bien développée.

Les dépôts et formations superficielles (dépôts de pente, éboulis, etc.) contrôlent en partie la vitesse de l'infiltration selon leur nature (consolidés, cimentés, etc.). Ces dépôts se caractérisent par une répartition spatiale variable selon la topographie, la lithologie et l'âge de leur formation.

Les morphologies associées à la dynamique actuelle ont également été cartographiées. Ils illustrent la fragilité du milieu : ravinement du sol à cause de l'intensité pluviométrique et absence d'un couvert végétal protecteur. Ceci facilite l'arrachement des particules fines qui cheminent via les pertes et provoquent une turbidité importante des eaux de sources lors des averses.

Cette étude permet l'application de l'analyse spatiale des modalités d'infiltration des eaux de pluies en croisant les formes et formations géomorphologiques avec d'autres paramètres (géologie, couverture bio-pédologique, précipitations et activités anthropiques). Cette approche sera menée dans la deuxième partie où nous reconstituons les sous systèmes intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques.

1.3 PARAMETRE «RESEAU HYDROGRAPHIQUE»

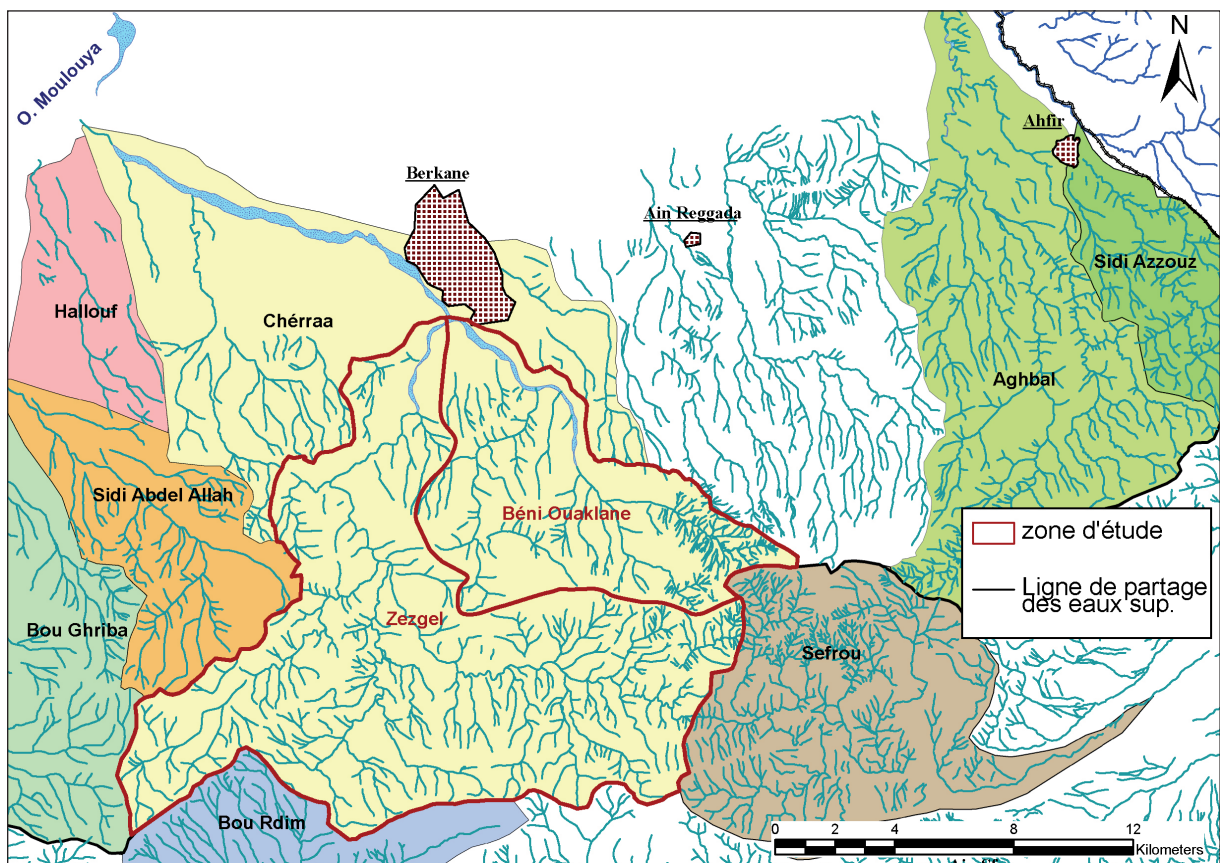
L'organisation hydrographique des oueds du massif de *Beni Snassen* résulte de la combinaison de multiples facteurs. Parmi ces facteurs, nous citerons : la nature lithologique, la pente, les données topographiques et les données climatiques.

Bien que ces réseaux hydrographiques soient spatialement bien développés, ils sont drainés par des écoulements aux débits modestes et aux régimes très irréguliers, ceci malgré la présence de nombreuses sources ; celles-ci n'assurant pas un écoulement permanent. La rareté des précipitations et l'importance de l'évapotranspiration sont les principales causes de l'irrégularité des écoulements qui drainent le massif des *Beni Snassen*.

La zone étudiée est drainée par les cours d'eau suivants (figure 1.23) :

- L'oued *Zegzel* qui constitue avec ses affluents la plus vaste entité hydrographique du massif des *Beni-Snassen*.
- L'oued *Beni-Ouaklane*.

L'oued *Zegzel* et l'oued *Beni Ouaklane* sont des affluents de l'oued *Cherraa*, lui-même principal affluent de la *Moulouya* en aval ; ces bassins versants se situent entièrement à l'intérieur du massif des *Béni Snassen* orientaux (figure 1.23).



Source : MNT 90m

Figure 1.23 : Les bassins versants des Béni Snassen orientaux

Avant de délimiter les bassins versants de ces oueds, dans un premier temps, nous allons étudier le relief et la pente qui constituent des facteurs intervenant dans l'organisation du réseau hydrographique.

1. Relief

L'altitude joue un rôle principal en hydrologie. Elle a des conséquences primordiales dans l'abondance des précipitations, l'évapotranspiration et la température. La variation d'hypsomètre d'altitude (figures 1.24 et 1.25), montre que les bassins versants sont entourés par des crêtes d'altitude élevées (1430 m). L'altitude diminue en aval en suivant le pendage général des assises géologiques.

Les courbes hypsométriques permettent de distinguer trois aspects orographiques qui sont visibles dans les deux bassins versants :

- **Partie amont** : elle constitue la partie d'altitude élevée (au dessus de 1 000 m). Par ce caractère elle est considérée comme le bassin de réception et la zone d'organisation du drainage. Cette partie présente 14 % de la superficie totale de la zone d'étude. Elle coïncide fréquemment avec de fortes pentes.
- **Partie moyenne** : cette partie constitue la longue section dans les deux bassins versants. L'observation de la figure 1.24, montre que 60% des superficies des bassins versants sont situées entre 600 et 1 000 m. Les superficies de plus de 1 000 m étant faibles.
- **Partie aval** : dans ce secteur les gorges et les vallées encaissées constituent le troisième aspect géomorphologique, elle présente 26 % de la zone d'étude.

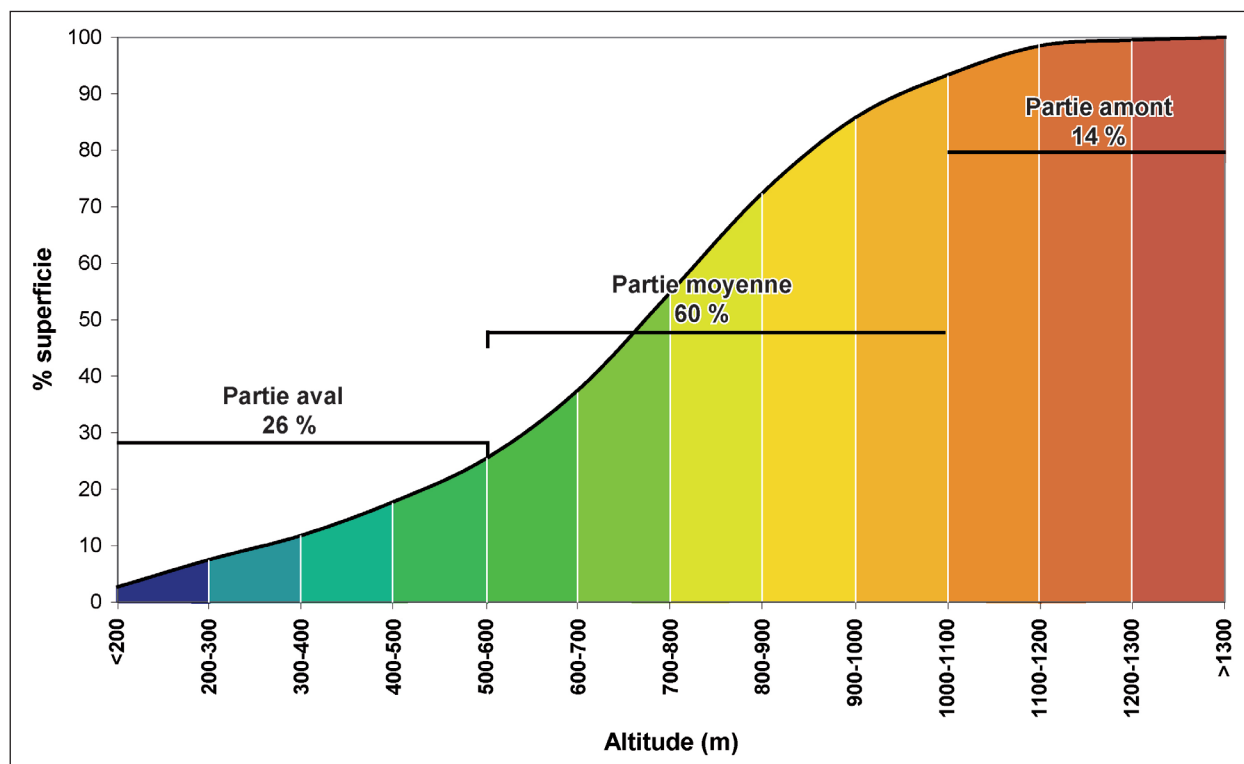
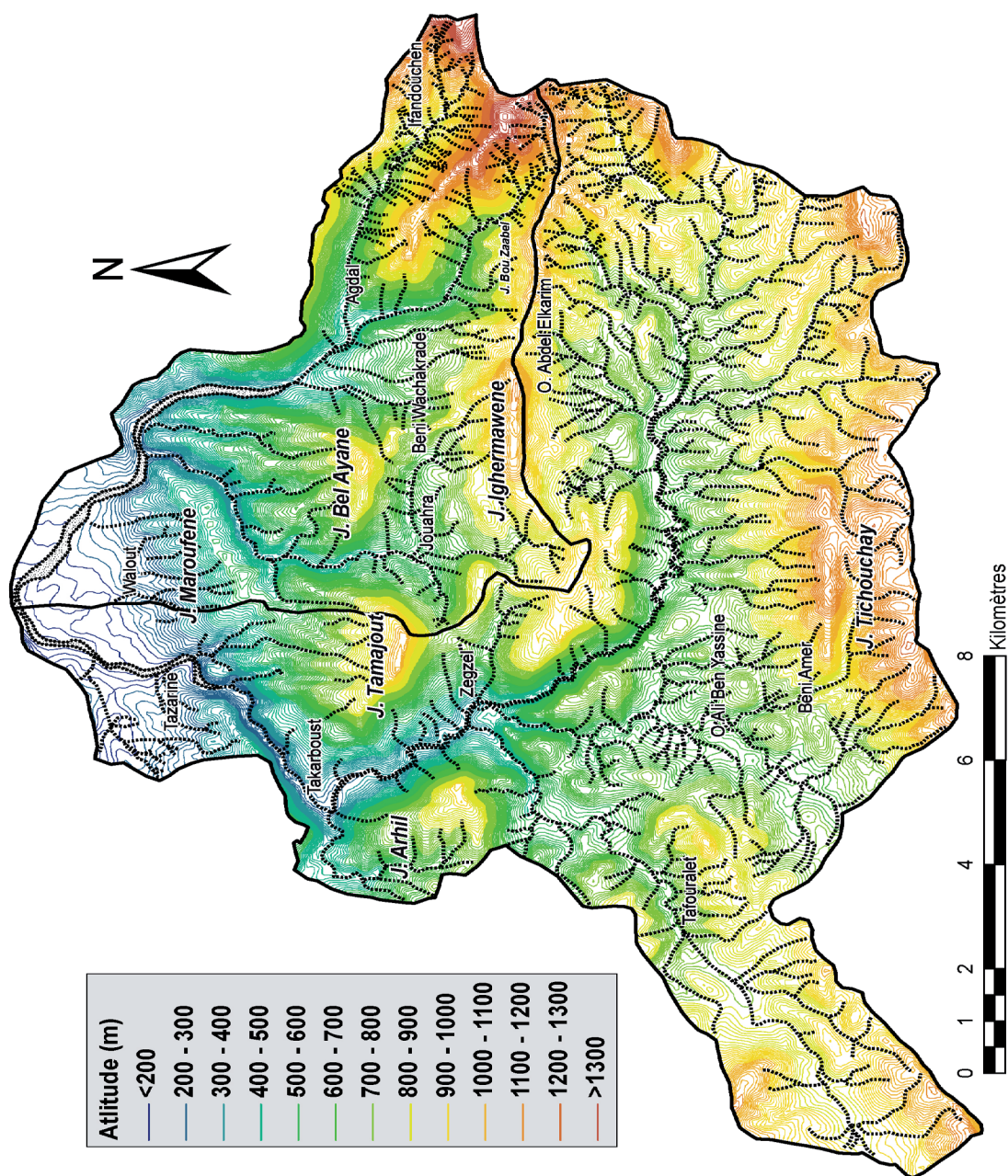


Figure 1.24 : Relation Altitude et superficie des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.



Source : SRTM (MNT 90 m)

Figure 1.25 : Carte hypsométrique des deux bassins versants Zegzel et Beni Ouaklane.

2. Pente

A partir du MNT 90 m, nous avons extrait les pentes qui ont été regroupées en 4 classes (tableau 1.2).

Classe %	Zegzel		Beni Ouaklane	
	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Superficie (km ²)	Superficie (%)
0-5	4	3	3	5
5-15	27	20	39	69
15-50	93	70	2	4
>50	9	7	13	23

Source : MNT 90 mètres

Tableau 1.2: Classes de pentes des bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane

Les deux bassins versants sont caractérisés par des pentes fortes. 70% de la surface du bassin versant Zegzel sont situés sur des pentes comprises entre 15 et 50%. Quant au bassin versant Beni Ouaklane, 23% de la superficie ont une pente supérieure à 50% et 69 % des surfaces sont situés sur une pente de 5 à 15%.

La carte des pentes (figure 1.26), permet de distinguer trois unités :

- ***unité de pente inférieure à 15%*** : elle représente les fonds de vallées (la vallée de Tazemmourt au niveau de Tafouralet et Trasrout, le fond de vallée d'oued Ali Ben Yassine etc.), les sommets aplanis (Arhil Naala, J. Tichouchay et J. Maaroufene) et le piémont.
- ***unité de pente supérieure à 15% et inférieure à 50%*** : elle représente une grande surface des deux bassins versants : l'امت de l'oued My Idriss, l'oued Tazemmourt, l'oued Ouartass, etc.
- ***unité de pente supérieure à 50%*** : elle correspond aux sommets surplombant l'oued Bou Zabal, oued Guetfane, oued Ouartass et les gorges de l'oued Ferrouj, oued My. Idriss et oued Zegzel. Cette forte pente influe sur la vitesse de ruissellement et l'importance de l'érosion dans ces zones.

Cette répartition spatiale des pentes engendre un cheminement rapide du ruissellement des eaux des averses ce qui donne une augmentation des débits et favorise les crues.

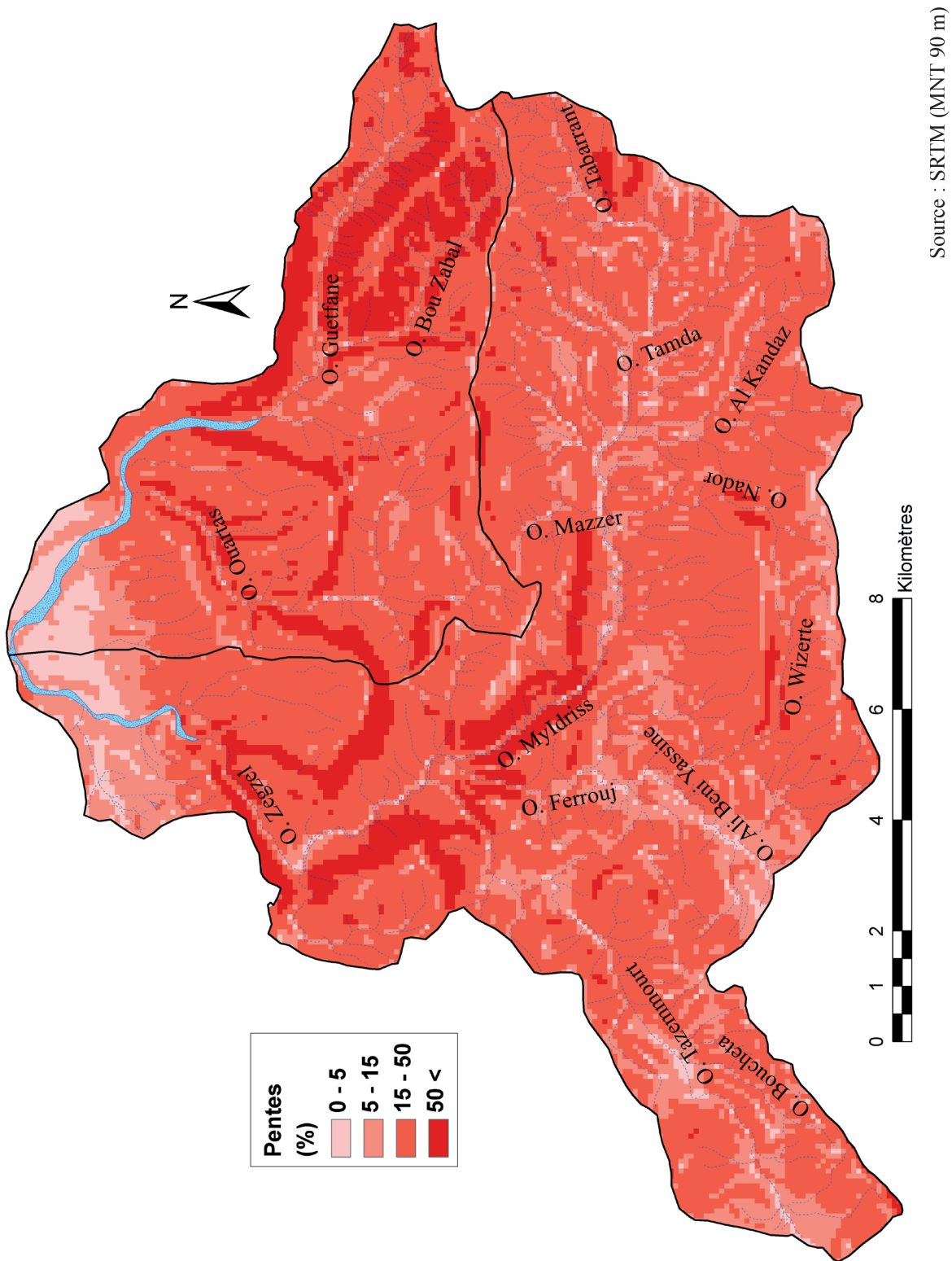


Figure 1.26 : carte des pentes en pourcentage des bassins versants Zegzel et Beni Ouaklane.

3. Réseau hydrographique

Les bassins versants du *Zegzel* et *Béni Ouaklane*, ont une superficie d'environ 190 km², et ils présentent une forme sub-rectangulaire, allongée Est-Ouest. Les crêtes qui les délimitent s'élèvent à des altitudes de 800 m (*J. Arhil*, situé à l'aval) à 1 430 m (*J. Fourhal*, à l'extrême Est du bassin) ; mais la majorité de ses reliefs se situent entre 700 et 1 000 m d'altitude, avec une altitude moyenne d'environ 850 m. Les vallées sont presque toutes encaissées et la pente qui surplombe les cours d'eau varie entre 15% et 50%, avec des parois verticales.

3.1. Le bassin versant de l'oued Zegzel

L'oued *Zegzel* traverse la montagne des *Béni Snassen* dans sa zone centrale. Il présente une superficie de 133.1 km². Il se compose de trois principaux affluents : oued *Tazemmourt*, oued *Ferrouj*, et oued *Moulay Idriss* (figure 1.27).

Oued Tazemmourt

C'est un large bassin versant taillé dans les marnes et les marno-calcaires du Lias supérieur. Il prend naissance sur le versant Nord-Ouest de jbel *Tamajdamt* à 1 176 m d'altitude.

Ce cours d'eau tombe, via la cascade de Tafouralet qui constitue des formations d'accumulations travertineuses (figure 1.27 (B)). A l'aval du Tizi Ou Zemmour, l'Oued devient plus encaissé et coule en gorges assez étroites taillées dans les calcaires et les calcaires dolomitiques du lias inférieur et moyen (figure 1.27 (C)). Dans cette partie, le lit suit une ligne presque droite d'orientation S O-N E.

Oued Ferrouj

L'oued *Farrouj* est alimenté par oued Ali Béni Yassine qui prend naissance sur les formations jurassiques du versant Nord de jbel *Tanezart* à 1 220 m d'altitude, et l'oued Wizert qui représente l'amont supérieur de la vallée des Béni Amyr. Il est situé sur le front sud de la crête de jbel *Tichouchai* à une altitude de 950 m. Son encaissement fait affleurer les basaltes du Trias. Au niveau de jbel *Arhil Acham*, l'oued *Ferrouj* coule en gorge au niveau de la grotte du Chameau.

Oued Moulay Idriss

Il draine les montagnes du sud et de l'est de la chaîne. Il est très ramifié, mais la grande majorité de ses affluents sont temporaires. Il est alimenté par un réseau important d'affluents : sur la rive droite nous trouvons l'oued *Mazzer*, sur la rive gauche on note: l'oued *Tabarrant*, l'oued *Tamta*, l'oued *Al Kamdaz*, l'oued *Nador*. Ces derniers, prennent naissance sur le versant N de Jbel *Tichouchay*, qui draine des calcaires jurassiques. Avant la confluence de l'Oued *Moulay Idriss* avec oued *Ferrouj* l'écoulement se fait en gorges très étroites.

Après avoir reçu ces principaux affluents à Arougène, le *Zegzel* coule dans une direction Sud Ouest-Nord Est, en taillant des gorges profondes et étroites creusées dans les calcaires jurassiques et en affleurant par endroit les schistes primaires et les basaltes du Trias. Au piémont il rejoint l'oued *Chérreaa*.

Le réseau de l'oued *Zegzel* est composé essentiellement d'affluents temporaires, malgré les grandes réserves d'eau sous-jacentes ; les seuls tronçons qui présentent un écoulement permanent ou semi permanent sont à l'aval de petites résurgences situées dans la partie avale.

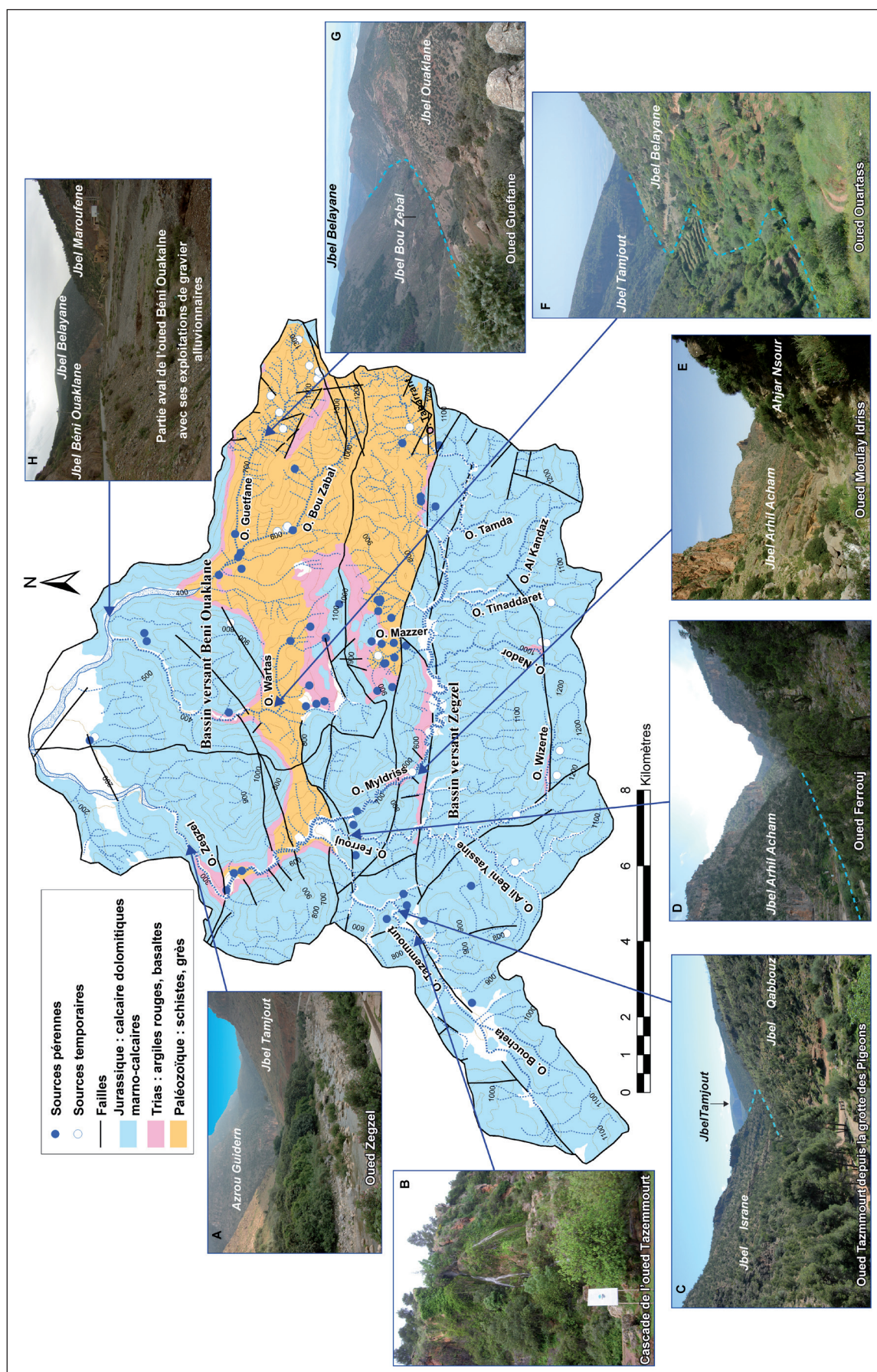


Figure 1.27 : Réseau hydrographique des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.

En fait, le tronçon où l'écoulement estival est relativement soutenu se situe en aval de la résurgence de la grotte du Chameau. Les eaux de celle-ci alimentent l'oued *Ferroujj*. L'oued *Moulay Idriss* est alimenté par *Ain Halouma*.

A sa sortie des *Béni Snassen*, le *Zegzel* présente un écoulement presque permanent. L'écoulement est assuré par de nombreuses sources karstiques (figure 1.27 (A)).

3.2 le bassin versant de l'oued beni Ouaklane

Ce bassin versant est limité entre les crêtes de J. *Béni Ouaklane* vers le Nord, et les crêtes de J *Irermawene* vers le sud. Il est limité à l'est par les crêtes de J *Fourhal*. Il couvre une superficie de 56.3 km².

Dans sa partie amont ses affluents sont : l'oued *Ouartass*, l'oued *Bou Zabel* et l'oued *Guetfane*.

Oued Ouartass

Le sous bassin versant Ouartass prend naissance à jbel *Irermawene* (1 150 m) il est coincé entre le bassin versant Zegzel vers l'ouest et le sous bassin versant de Bou Zabel vers l'est. Son parcours est caractérisé par la rupture de pente ce qui a permis le développement d'une accumulation travertineuse au niveau de Jwakra. A l'aval des Beni Ouachkrad, la vallée se rétrécit de plus en plus en formant un cours d'eau encaissé dans la série calcaréo-dolomitique.

Oued Bou Zabel et Oued Guetfane

Ils prennent naissance dans la partie sommitale du massif (1 430 m à J *Fourhal*) (figure 1.27 (G)). Ces deux affluents drainent des schistes et des granites ce qui explique la forte densité du réseau hydrographique. Avant leurs confluences avec L'oued Ouartass, ils coulent en gorges.

Dans sa partie avale, le cours d'eau de l'oued *Béni Ouaklane*, présente un profil transversal en « U » ; il est creusé dans les calcaires jurassiques (figure 1.27 H).

Les deux bassins versants, Zegzel et Beni Ouaklane, ont des caractéristiques physiques différentes ce qui influence d'une façon directe leur organisation spatiale et leur comportement hydrologique.

4 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant ont une importance majeure car elles interviennent, dans les modalités de l'écoulement superficiel, et elles influencent sa réponse hydrologique, notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques intervenant dans le comportement hydrologique des bassins versants. Les facteurs physiques des bassins versants Zegzel et Beni Ouaklane sont récapitulés dans le tableau suivant (tableau 1.3) :

Superficie

Le bassin versant est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. les débits vont donc être en partie reliés à la surface. La superficie correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant de *Zegzel* est deux fois plus grande que celle de *Béni Ouaklane*.

	Zone d'étude	BV Zegzel	BV Beni Ouaklane
Superficie (km ²) [A]	189,4	133,1	56,3
Périmètre (km) [P]	73,3	75,5	39,2
Altitude max (m)	1 430	1 270	1 430
Altitude min (m)	160	160	160
Altitude moy. (m)	854,7	837	863
Dénivelé théorique [D _t]	1 270	1 110	1 270
Longueur des drains (km)	46,6	31,1	15,5
L'indice compacité [KG]	1,5	1,8	0,9
Densité réseau hydrographique [D]	2,3	2,7	2,6

Tableau 1.3 : Caractéristiques physiques des bassins versants étudiés.

Périmètre

Le périmètre représente la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Le périmètre du bassin versant Zegzel est de 75.5 km, celui de Beni Ouaklane est de 39.2 km.

Densité de drainage

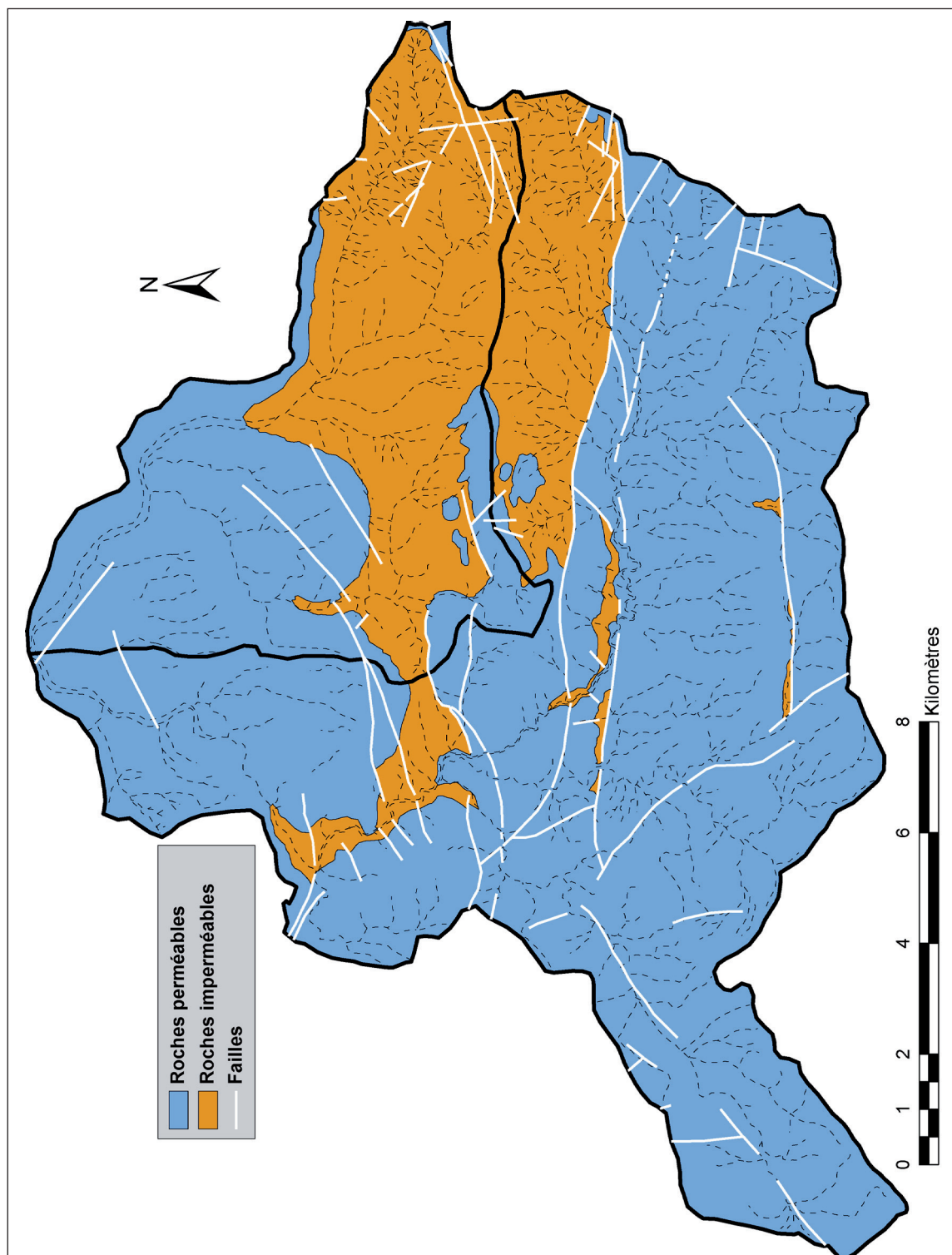
La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques. Pour calculer la densité de drainage, nous avons croisé le réseau hydrographique de chaque bassin versant avec la nature géologique des assises (figure 1.28). Deux grands types de perméabilité de substrats sont à distinguer :

- **les terrains imperméables** regroupent les formations paléozoïques et triasiques. Ces formations constituent le substratum de l'aquifère karstique ;
- **les terrains perméables** rassemblent les substrats qui peuvent être pénétrés et traversés par l'eau. Dans cette étude ces terrains correspondent aux formations calcairo-dolomitiques et marno-calcaires. Les dernières formations présentent l'existence de niveaux de lits marneux qui permettent le captage de l'eau à ces niveaux et diminue la perméabilité

En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles : 2,3 pour le bassin versant *Zegzel*, et 1,7 pour *Béni Ouakane*, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées 4,1 km/km² pour *Zegzel* et 3,4 km/km² pour *Beni Ouaklane* (tableau 1.4).

La densité totale de drainage, des deux bassins versants, est presque identique avec 2,7 pour *Zegzel* et 2,6 pour *Béni Ouaklane*, bien que la superficie de *Zegzel* soit deux fois plus grande avec 133,1 km² par rapport à 56,3 km² pour *Béni Ouaklane* ; les valeurs de la densité du drainage s'expliquent, en partie, par la superficie des terrains imperméables qui couvrent 29,2 km² soit 34% de la superficie totale du bassin versant *Beni Ouaklane* et 18,9 km² pour le bassin versant *Zegzel* soit 22 % de sa superficie.

En outre, la forte densité de drainage du bassin versant *Béni Ouaklane* peu s'expliquer également par l'importance des précipitations enregistrées dans la partie sommitale des *Béni Snassen* (1 430 m à *J Fourhal*) en plus de la nature du substrat (schistes et granites).



Sources : (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie, 2001, 2004)

Figure 1.28: Perméabilité de la zone d'étude (les bassins versants Zegzel et Béné Ouaklane).

Le bassin versant Zegzel

	Superficie (km ²)	Σ réseau hydrographique (km)	Densité réseau hydrographique
Imperméable	18,9	76,6	4,1
Perméable	114,2	280,6	2,5
Total	133,1	357,2	2,7

Le bassin versant Béni Ouaklane

	Superficie (km ²)	Σ réseau hydrographique (km)	Densité réseau hydrographique
Imperméable	29,2	99,9	3,4
Perméable	27,1	46,5	1,7
Total	56,33	146,4	2,6

Zone d'étude

	Superficie (km ²)	Σ réseau hydrographique (km)	Densité réseau hydrographique	Hierarchisation du R.H (Strahler)
Imperméable	48	176,6	3,7	4
Perméable	114,1	257,2	1,8	5
Total	189,4	433,8	2,3	-

Tableau 1.4 : Densité du drainage des bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.

NB : tous les drains du secteurs étudié sont intermittents (oued) sauf O. Zegzel en aval de Zegzel (12 km linéaire).

La hiérarchisation du réseau hydrographique selon la méthode de Strahler donne l'ordre de 4 pour les zones imperméables et la valeur 5 pour les zones perméables. Cette faible variation est liée à la présence des terrains marno-calcaires à l'entêtes des bassins calcaires.

Indices de compacité

L'indice de compacité (KG) renseigne sur la forme du bassin versant. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963):

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant, mesuré en estompant les irrégularités de la limite réelle qui n'ont aucune influence sur les écoulements ;

A : Superficie du bassin versant en km² ;

Le calcul de l'indice de compacité donne les valeurs suivantes : 1,8 pour Zegzel et 0,9 pour Beni Ouaklane. Ces valeurs traduisent que la forme de ces deux bassins versants est allongée. Cette forme favorise la concentration rapide du ruissellement pendant les fortes pluies.

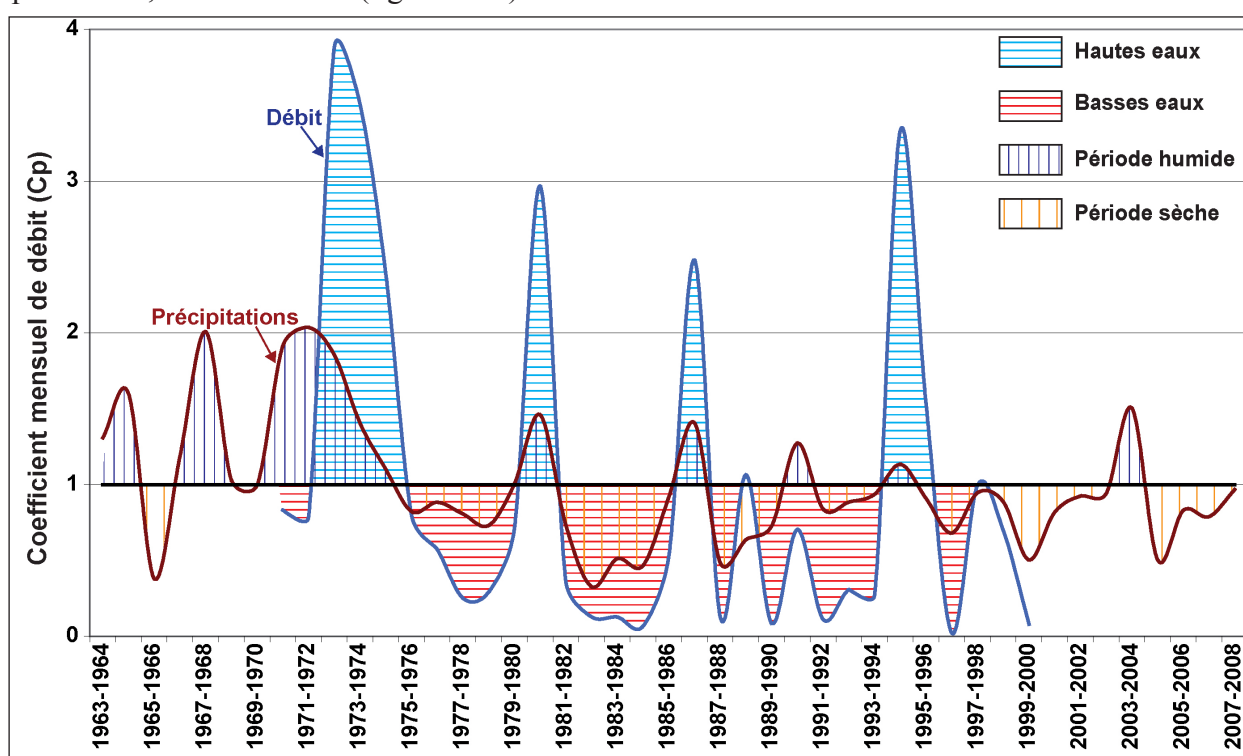
5. Régime hydrologique

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est généralement appréhendé par l'étude de la variabilité des écoulements dans le temps. Seul l'oued *Zegzel* est équipé d'une station de jaugeage, nous ne disposons d'aucune donnée concernant le débit de l'oued *Béni Ouaklane*.

Les données hydrologiques de la période (1970/2000) ont fait l'objet d'une étude statistique afin de montrer l'irrégularité temporelle du débit de l'oued *Zegzel*.

5.1. Variation interannuelle

L'examen de la figure 1.29, qui présente le coefficient mensuel¹ interannuelle de débit de l'oued *Zegzel* croisé avec le coefficient mensuel interannuelle des précipitations (VIVIAN, 1977), permet de repérer deux grands types de comportement de l'oued *Zegzel* : les années de hautes eaux (1972/1975, 1980/1981, 1986/1987 et 1994/1996), et les années de basses eaux le reste de la période d'observation. Les valeurs de hautes eaux coïncident, bien entendu, avec les années pluvieuses, et inversement (figure 1.29).



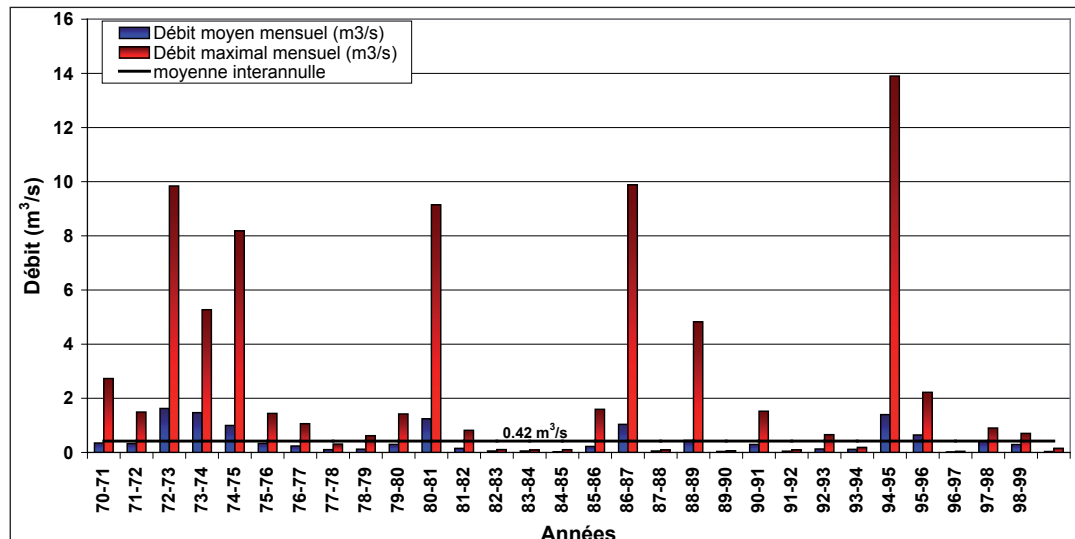
Sources : Météo Maroc et Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya

Figure 1.29 : Relation coefficient d'hydraulicité interannuelle des précipitations (Tafouralet) et de débit (oued *Zegzel*) 1970/2000.

Pendant cette période d'observation du débit de l'oued *Zegzel* (1970/2000), le débit varie de 1,6 m³/s en 1972/1973 à 0,1 m³/s en 1966/1967. Cette irrégularité temporelle est visible sur la figure 1.30. La figure croise le débit maximal mensuel et le débit moyen mensuel. L'examen de cette figure

1. C'est le rapport entre le débit moyen annuel d'une année donnée et le débit moyen interannuel de la période d'observation. Les périodes humides correspondent aux coefficients supérieurs à 1.

illustre les crues répétées de l'oued *Zegzel*. La plus importante crue est enregistrée en 1994/1995 avec un maximum de débit de 13,9 m³/s. Cette crue coïncide avec des fortes précipitations : 352 mm enregistrés pendant les mois de février et mars. Cette figure illustre également l'aridité de l'Oued. En dehors de ces crues l'oued *Zegzel* est presque à sec. Pour ce type de régime la moyenne interannuelle n'est pas représentative.



Sources : Météo Maroc et Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya

Figure 1.30 : Irrégularité temporelle du débit de l'oued. *Zegzel* (1970/2000).

5.2. Variation mensuelle

Les variations saisonnières sont marquées par un pic du coefficient mensuel de débit en mars avec une moyenne mensuelle interannuelle de 1.4 m³/s et des débits très bas entre juin et octobre avec un minimum enregistré en août de 0.09 m³/s (figure 1.31)

Cette figure montre que la saison des hautes eaux commence au mois de février pour finir en mai, ce qui met en évidence un léger décalage avec les précipitations automnales et les hautes eaux du printemps.

Ce décalage peut s'expliquer ainsi : après la longue période estivale, les premières pluies automnales permettent la recharge des réservoirs karstiques, quand les pluies deviennent plus fréquentes, l'écoulement superficiel devient plus important.

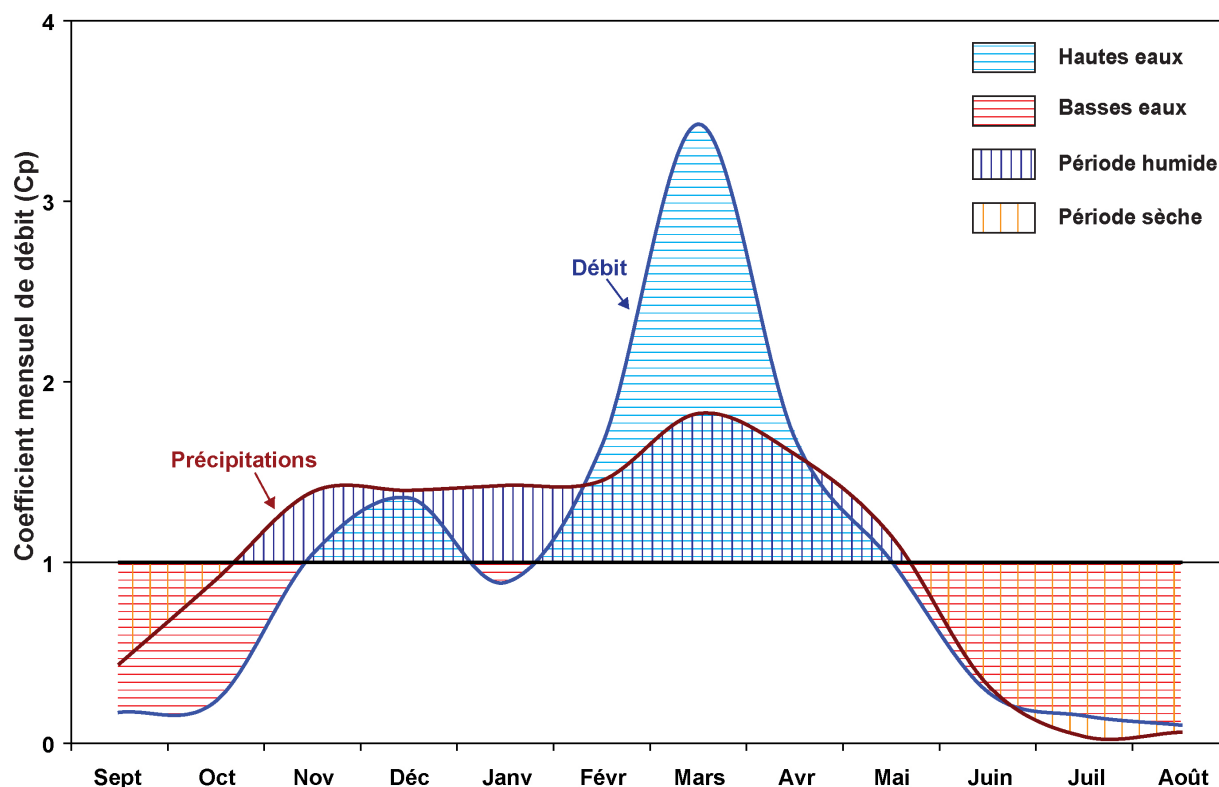
Il est intéressant de signaler que le débit de l'oued *Zegzel* est assez soutenu par les eaux des sources karstiques qui jaillissent en aval et qui alimentent les seuls tronçons présentant un écoulement permanent ou semi permanent : à l'amont de ces sources les oueds sont quasiment à sec.

5.3. Variation journalière

Pendant les périodes pluvieuses, l'oued connaît souvent des crues très brutales (43 m³/s le 01 mars 1995). Tandis que pendant les périodes sèches l'oued est à sec, la figure 1.32 met en évidence cette relation débit/précipitations.

L'étude du régime hydrologique de l'oued *Zegzel* permet de déduire les conclusions suivantes :

- la pluviosité est un facteur essentiel dans le comportement hydrologique : les hautes eaux correspondent à des périodes pluvieuses et vice versa, à l'exception des périodes



Sources : Météo Maroc et Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya

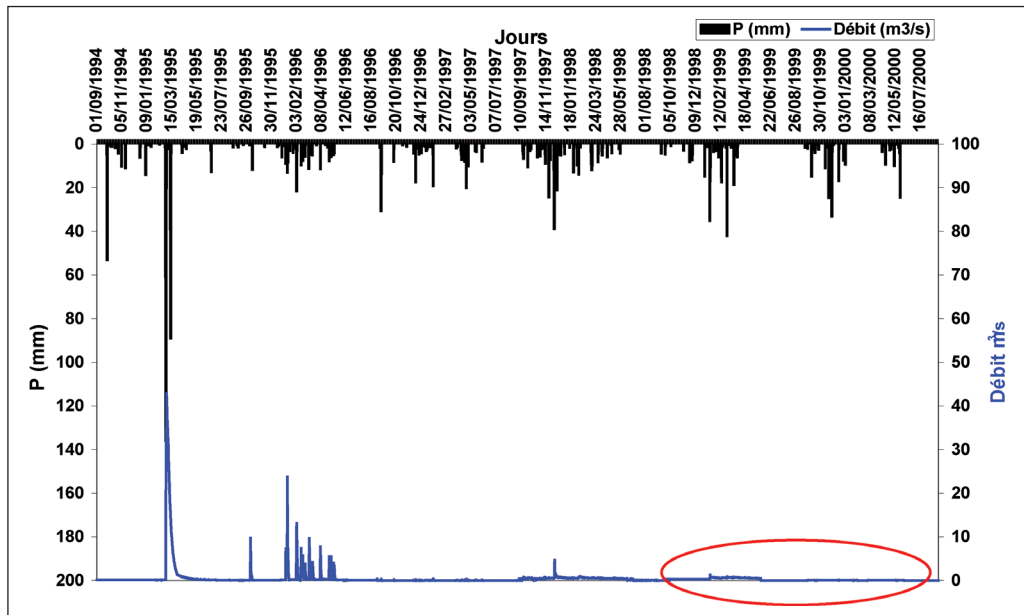
Figure 1.31 : Coefficient mensuel de débit (oued Zegzel) et moyenne mensuelle des précipitations (Tafouralet) 1970/2000.

pluvieuses suivantes : septembre/février 1998, janvier/avril 1999 et septembre/octobre 1999 dont la corrélation précipitation/débit n'est pas visible. Ceci peut être lié à la pertinence des données ;

- l'aquifère karstique influence le comportement des écoulements superficiels : Les premières pluies automnales tombent après une longue période d'aridité de 4 mois en moyenne (juin, juillet août et septembre). Dans un premier temps, ces pluies rechargent les réserves karstiques; au printemps les sources karstiques alimentent les oueds, cette variabilité d'influence se traduit par la relation entre le réseau hydrographique et l'aquifère karstique.

Il sera intéressant de montrer d'une façon plus détaillée à quelle période le réseau hydrographique alimente l'aquifère et inversement.

Il est important de noter que le choix de croisement de débit journalier de l'oued Zegzel avec les données pluviométriques de la station de Berkane (station qui se trouve en aval du bassin versant) est imposé par le manque de données pluviométriques au pas de temps journalier des stations situées en amont.



Sources : Météo Maroc et Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya

Figure 1.32 : Relation entre les précipitations journalières de la station de Berkane et le débit journalier de l'oued Zegzel (1994/2000).

Conclusion

L'organisation du réseau hydrographique et le comportement du régime hydrologique sont influencés par l'ensemble des paramètres physiques du bassin versant. Ces facteurs sont : la nature et la perméabilité de la roche en place, la pente, la forme géométrique des bassins versants, la pluviosité, l'aquifère karstique etc. La différence de ces caractéristiques physiques des deux bassins versants (Tab.1, 2 et 3) suggère deux bassins versants bien distincts :

- le bassin versant *Zegzel* est deux fois plus grand que le bassin versant *Béni Ouaklane* ;
- la densité du drainage est la même pour les deux bassins versant (environ 2,7 km²/km) ;
- les terrains imperméables couvrent 29,2 km² dans le bassin versant *Béni Ouaklane* et 18,9 km² dans bassin versant *Zegzel* soit respectivement 52 % et 14 % de leur surface ;
- la présence des sources karstiques importantes en l'aval de l'oued *Zegzel* assure un écoulement permanent tandis que le débit de l'oued *Béni Ouaklane* n'est lié directement qu'aux précipitations (pics de crues et de sécheresse) ;
- l'importance des terrains calcaires dans le Bassin versant *Zegzel* favorise l'infiltration mais donne par conséquence des sources karstiques abondantes, donc un soutien d'été.

Le comportement hydrologique des deux bassins versants étudiés se caractérise par une grande variabilité temporelle des écoulements. Le premier constat, tiré de cette première analyse, est que les oueds sont totalement à sec en dehors des périodes pluvieuses (lors des averses) et en amont des sources karstiques. Les oueds, notamment l'oued *Zegzel*, présentent un écoulement quasi-permanent en aval, grâce à l'alimentation de l'aquifère karstique. Le débit de ces oueds augmente au printemps (de mars à mai) après la recharge de l'aquifère karstique et l'augmentation de débit des sources.

1.4 PARAMÈTRE « CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX »

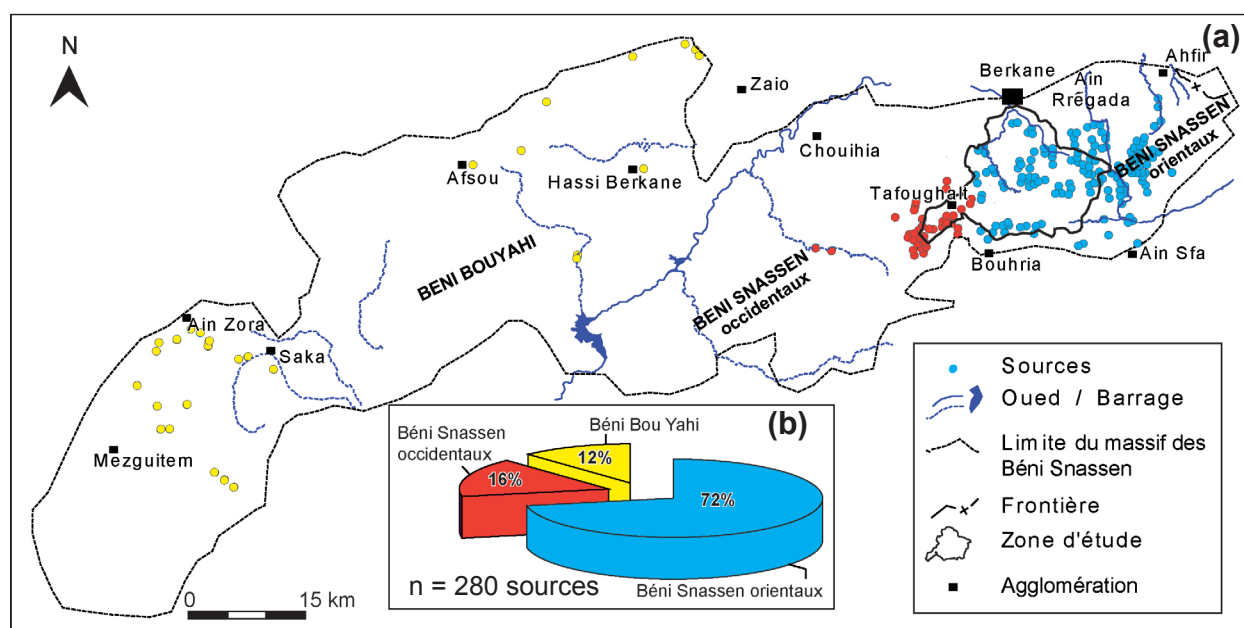
L'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des sources karstiques nécessitent une bonne connaissance de la délimitation du bassin d'alimentation des sources étudiées. Elle nécessite, également, une vue globale de la nature et du fonctionnement de la roche aquifère. Dans notre cas d'étude, nous utiliserons l'hydrochimie comme moyen d'étude pour définir les caractéristiques chimiques des systèmes karstiques.

Le type de roche est le facteur principal qui donne les caractéristiques chimiques à l'eau : la minéralisation acquise par les eaux karstiques dépend à la fois de l'environnement géochimique qu'elles traversent, mais également, de leur temps de résidence au contact de cet environnement. La particularité des aquifères karstiques réside dans l'existence d'axe de drainage où les écoulements sont rapides et peu propices à la réalisation de mélanges. Ceci rend possible l'étude de l'hétérogénéité spatiale de l'aquifère à partir de l'examen de la variabilité temporelle du chimisme des eaux à son exutoire (BAKALOWICZ, 1979).

Dans cette réflexion, notre travail s'est heurté à une insuffisance de données dans les travaux hydrogéologiques de ce massif. La plupart des travaux se focalisent sur la plaine de Triffa.

Pour ce présent travail, les données exploitées ont donc été collectées sur le terrain de manière ponctuelle. Ceci ne permet pas d'appréhender le fonctionnement des eaux souterraines mais de définir les caractéristiques des eaux suivies. Pour ceci, nous allons faire appel à plusieurs études de traitement des eaux souterraines.

Les eaux du massif des *Béni Snassen orientaux* (à l'exception de la source de Tafouralet qui se trouve dans les Béni Snassen occidentaux) ont été échantillonnées sur le terrain pendant quatre missions (printemps 2008, 2009, et automne 2008, 2009). Les *Béni Snassen orientaux* ont été choisies comme terrain de recherche en raison de l'importance relative de la ressource en eau fournie majoritairement par l'aquifère karstique du Lias. 72% des ressources en eaux de l'ensemble du massif des *Béni Snassen* se trouvent dans les Béni Snassen orientaux, les Béni Snassen occidentaux et les Béni BouYahi abritent respectivement 16 et 12% de cette ressource (TAYEBI *et al.*, 2009) (figure 1.33).



Source : Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya, complété sur le terrain

Figure 1.33 : (a) Carte de répartition des ressources en eaux dans le massif des Béni Snassen. (b) pourcentage des sources par zone géographique.

Les prélèvements ont été effectués pendant deux saisons contrastées : saison de hautes eaux au printemps et de basses eaux à l'automne ; ces prélèvements sont exploités pour mettre en évidence l'influence de l'écoulement des sources sur leurs qualités physico-chimiques.

Sur le terrain, nous avons distingué trois types de sources : celles qui jaillissent dans les terrains calcaires, d'autres dans les terrains basaltiques, et certaines dans les terrains schisteux. Pour mener à bien cette étude nous respecterons cette distinction géologique.

Il est à souligner que à cause du manque de données concernant les limites des bassins d'alimentation karstique (BAK), l'évaluation de la vulnérabilité des eaux, sera appliquée sur les limites des bassins versants (Zegzel et Béni Ouaklane).

Les paramètres traités dans cette partie sont la température, la conductivité, la teneur en éléments chimiques, l'évaluation de la dissolution spécifique et la turbidité.

1. La température de l'eau

L'augmentation de la température s'effectue d'une manière irrégulière, variant de 14 à 25 °C, traduisant ainsi une certaine complexité structurale du massif et reflète le rôle de grandes failles responsables d'un compartimentage de l'aquifère profond (figure 1.34).

La mise en évidence d'une corrélation entre la température de l'eau des quatre prélèvements et l'altitude (figure 1.35), illustre que les températures inférieures à 17°C correspondent aux mesures effectuées en automne et aux sources situées en altitude (800 m). Néanmoins, la figure révèle que l'altitude et la saisonnalité des eaux de température supérieure à 20 °C assemblent à la fois des mesure effectuées en automne et au printemps à différentes altitudes (de 200 à 900m). L'altitude et la saisonnalité ne sont donc pas les seuls facteurs de l'irrégularité de la température des sources suivies. La complexité structurale influe également sur la température des eaux.

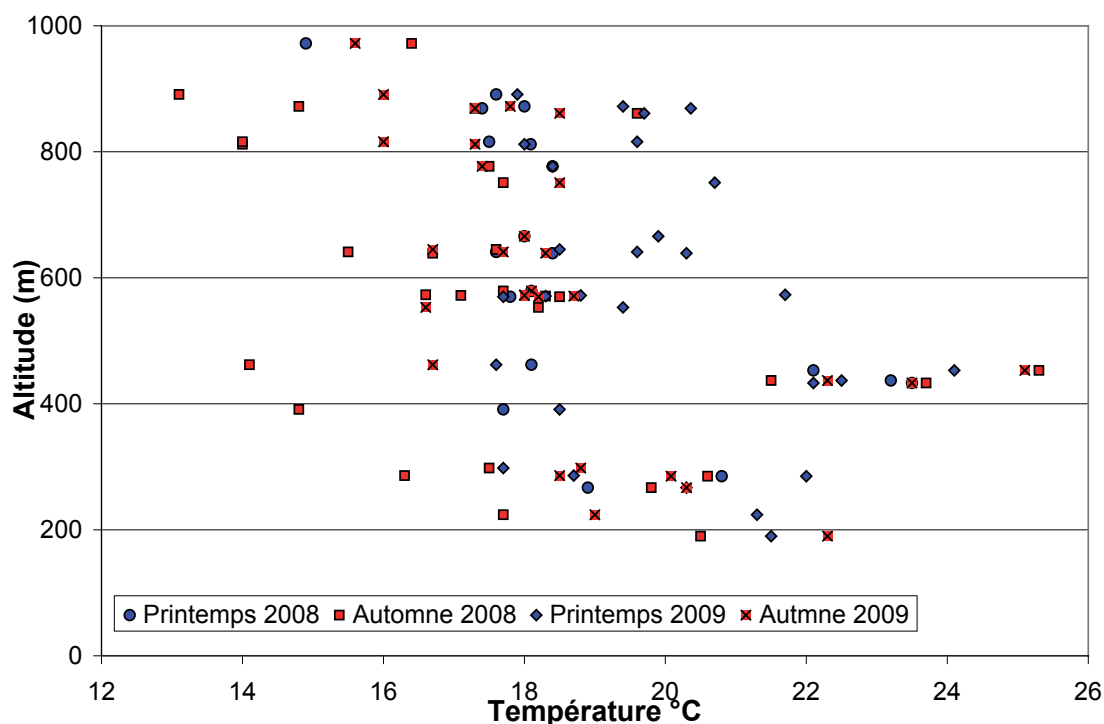


Figure 1.35 : Relation entre la température moyenne des sources et l'altitude (2008/2009).

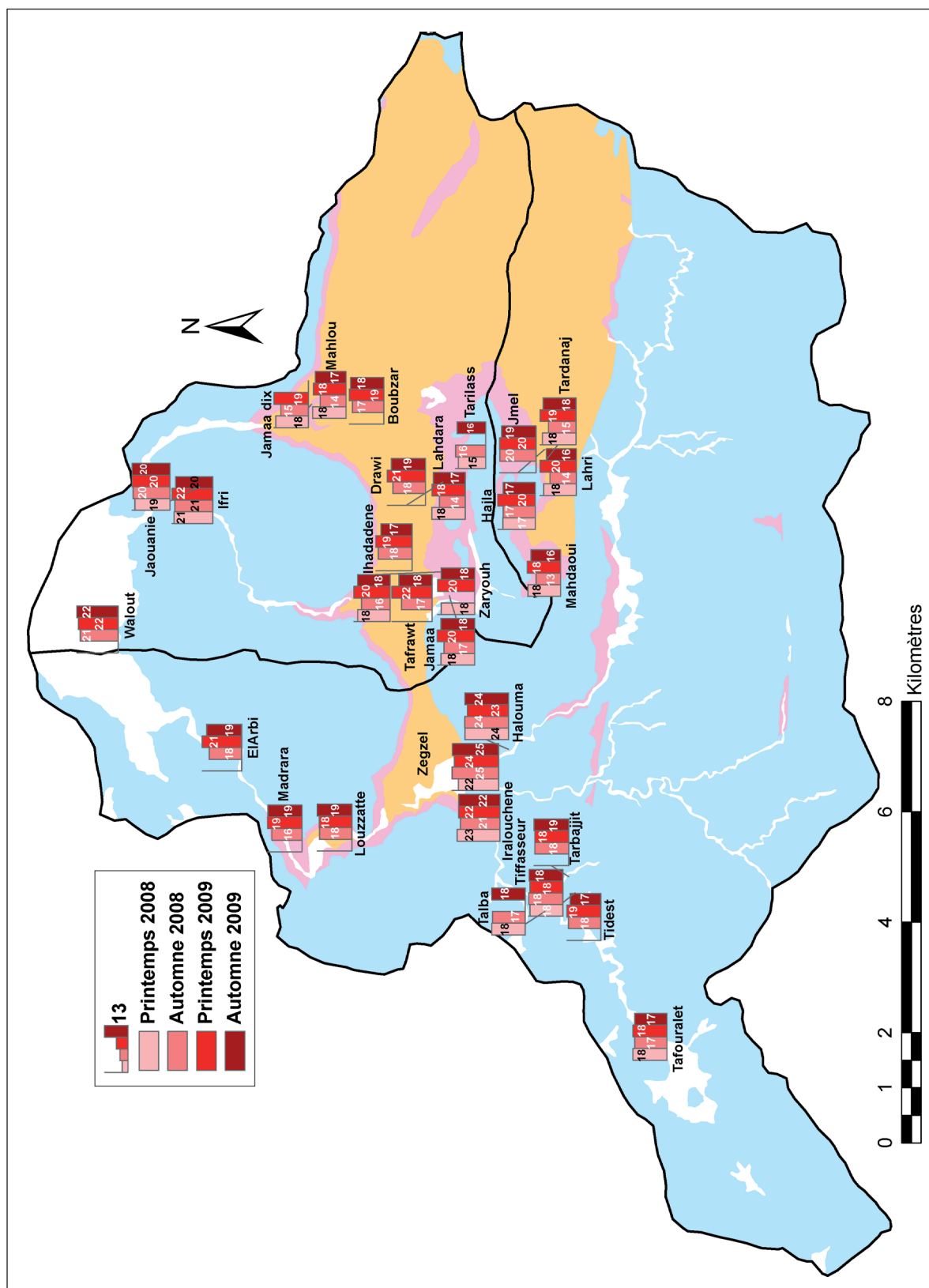


Figure 1.34 : Comparaison de la température des sources étudiées.

Pour mettre l'accent sur l'irrégularité thermique, nous avons comparé la température relevée pendant les quatre missions. Les sources ont été classées en trois grandes unités selon la nature géologique du terrain de leur zone d'émergence.

1.1 Les sources émergentes dans les terrains calcaires

Les sources karstiques sont réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, leurs températures sont très variables d'une source à l'autre et d'un prélèvement à l'autre ; il est intéressant de noter que les prélèvements sont ponctuels dans le temps, ce qui ne reflète pas la variation réelle de la température des sources (figure 1.36), mais donne une première vue d'ensemble pour distinguer les différents aquifères.

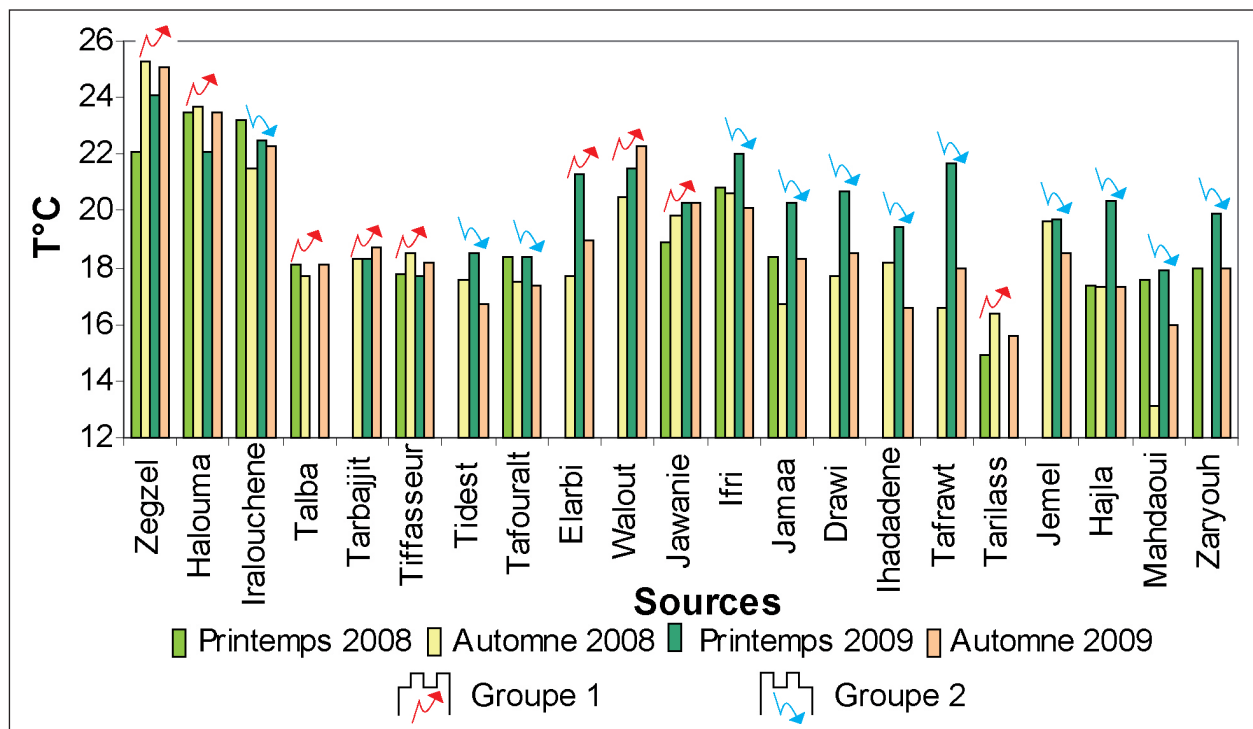


Figure 1.36 : Température des sources karstiques (2008/2009).

L'examen de la carte de température des sources (figure 1.34) et la figure 1.36 permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'existence de deux groupes de sources : groupe 1 dans lequel la température des eaux n'est pas influencée par la température saisonnière. Dans ce groupe, les températures mesurées au printemps sont inférieures à celles enregistrées en automne. Par contre dans le groupe 2, les températures des eaux mesurées en automne sont plus faibles par rapport à celles enregistrées au printemps ;
- La température moyenne des sources karstiques est de 19,3°C ;
- La température maximale atteint 25°C (Zegzel), tandis que la température minimale est de 15°C (Tarilass) ;
- Une irrégularité spatio-temporelle de la température des sources karstiques ;
- Les sources les plus chaudes se localisent dans la même zone, avec une température

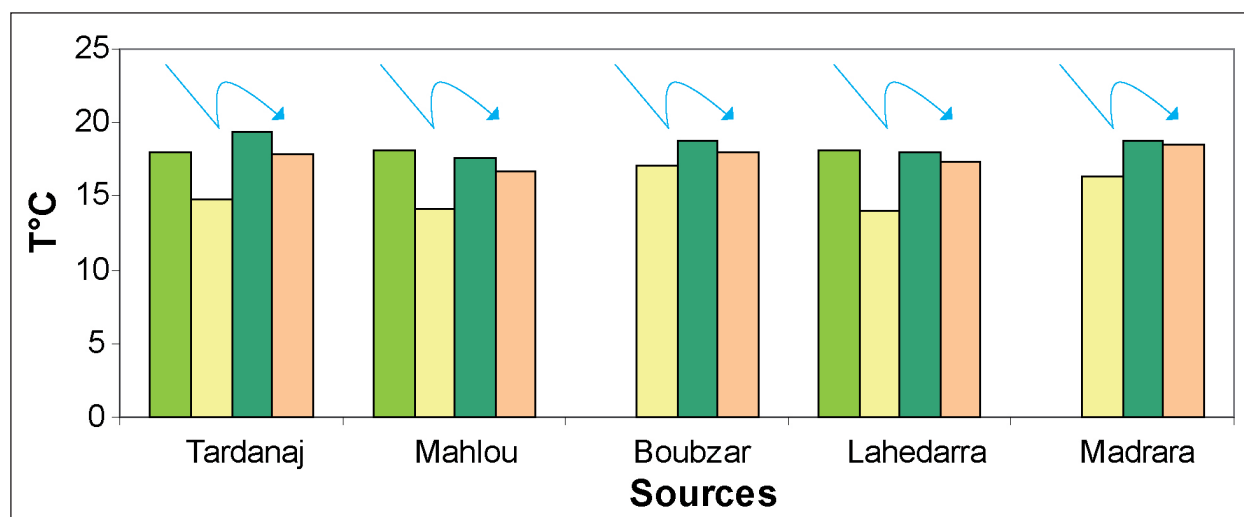
moyenne de 23°C (source de *Zegzel*, *Halouma* et *Iralouchene*) ;

- Une faible variation de la température des sources d'un prélèvement à l'autre : de 0 à 3°C (seule la source de Tafrawt représente une variation de 5 °C) ;
- La température élevée de certaines sources et le faible écart de la température (moins de 3°C) d'un prélèvement saisonnier à l'autre, reflètent l'importance des réserves karstiques.

Bien que les sources qui émergent dans les terrains basaltiques et schisteux, ne fassent pas partie de notre problématique, leur intégration est importante dans la compréhension des caractéristiques et les fonctionnements des sources karstiques.

1.2. Les sources émergentes dans les terrains basaltiques

Le nombre de sources suivies dans ce cadre se limite à cinq (figure 1.37) :



(Légende cf. figure 1.36)

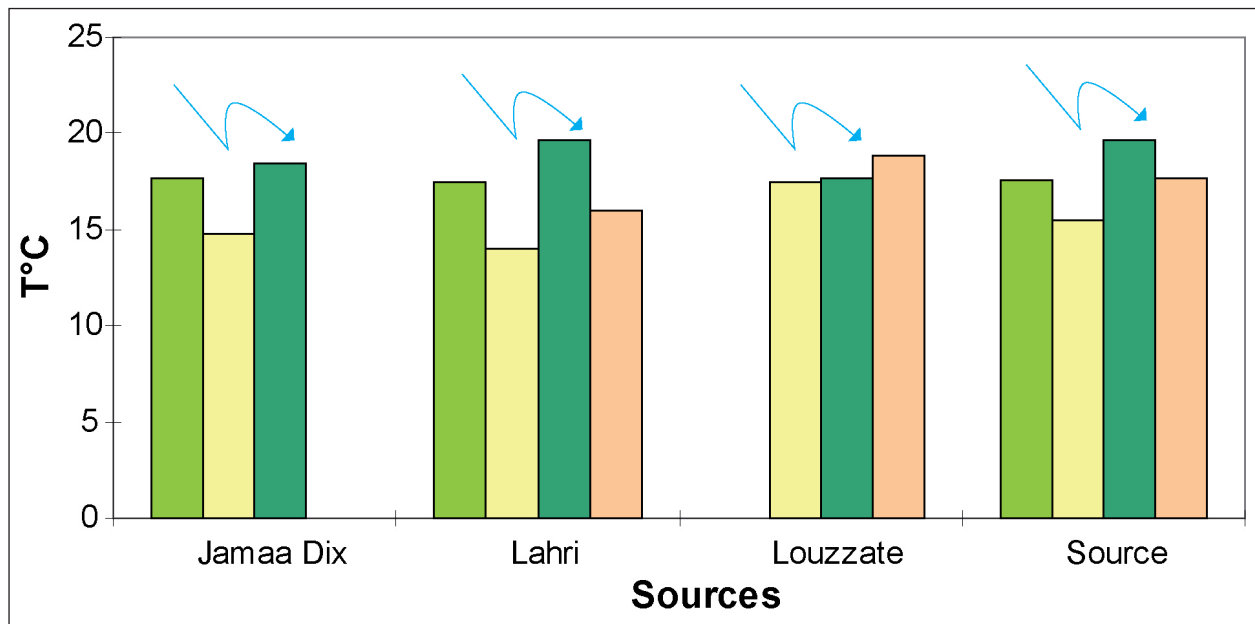
Figure 1.37 : Température des sources basaltiques (2008/2009).

On note que la température maximale de ces sources est inférieure à 19°C (*Boubzar*), que la température minimale est de 14°C (*Lahedarra*) et que la température moyenne de toutes ces sources est de 17°C. Toutes ces sources sont classées dans le groupe 2 dans lequel la température des eaux est en corrélation avec la température saisonnière.

1.3. Les sources émergent dans les terrains schisteux

Le graphe ci-dessous montre la comparaison de la température des sources situées dans le terrain schisteux (figure 1.38).

La température moyenne de ces eaux est de 17°C avec un maximum de moins de 20°C pour la source de *Lahri* et un minimum de 14° pour la même source. Les sources qui émergent dans les terrains schisteux sont classées dans le groupe 2. La température des eaux est en corrélation avec la température saisonnière.



(Légende cf. figure 1.35)

Figure 1.38 : Température des sources schisteuses (2008/2009).

1.4. Discussions

Malgré les mesures ponctuelles du paramètre température, les résultats permettent de distinguer deux grands types de sources en fonction de la température des eaux de source :

- **Le groupe 1** se caractérise par une température des eaux non influencée par la température saisonnière : Les températures enregistrées au printemps sont supérieures à 18 °C, à l'exception de la source de Tarilass (15 °C). Ces valeurs sont plus faibles que celles enregistrées en automne et qui peuvent atteindre des températures élevées : 25 °C pour la source de Zegzel, 23 °C pour Ain Halouma. Il est important de noter que la période de hautes eaux correspond au printemps. La différence entre la température des eaux, peut être expliquée par l'approfondissement des nappes karstiques et l'importance du temps de séjour des eaux. Ces deux critères permettent l'augmentation de la température des eaux magasinées au sein de la roche encaissante. Ce groupe correspond uniquement aux sources qui émergent dans les terrains calcaires et dolomitiques.
- **Le groupe 2** concorde avec les sources dans lesquelles les températures élevées correspondent aux mesures relevées au printemps (18 °C environ), en revanche les températures faibles coïncident avec les mesures effectuées en automne (16 et 14 °C environ). Toutes les sources qui émergent dans les terrains basaltiques et schisteux appartiennent à ce groupe. Certaines sources karstiques ont également ce type de comportement (exemples : Tidest, Ihadadene, Mahdaoui, etc.). Ceci peut s'expliquer par le régime pluvial des sources appartenant à ce groupe où les températures des eaux sont en corrélation avec les températures saisonnières.

2. La conductivité électrique des eaux

La figure 1.39 regroupe les données sur la conductivité électrique des eaux des sources étudiées. Cette figure a été élaborée à partir des relevés effectués sur le terrain pendant quatre missions à

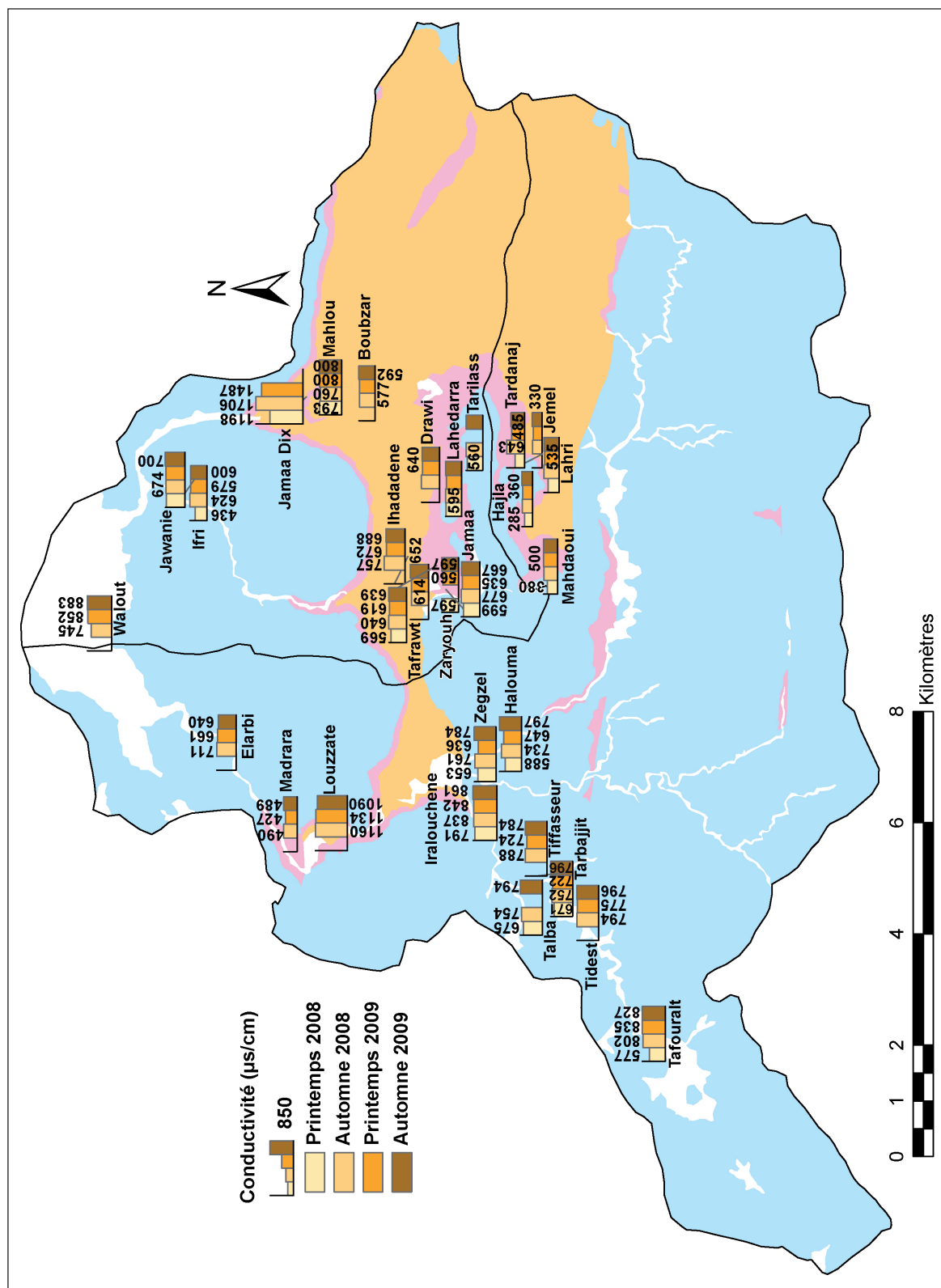


Figure 1.39 : Comparaison de la conductivité électrique des eaux des sources suivies.

des dates différentes.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de la figure sont :

- faible variation spatio-temporelle de la conductivité des eaux des sources ;
- la conductivité des eaux des sources est assez élevée : supérieure à 400 $\mu\text{S/cm}$ sauf pour les sources de Jemel (330 $\mu\text{S/cm}$) et Hajla (360 $\mu\text{S/cm}$). Les deux sources *Jamaa dix* et *Louzatte* présentent une conductivité supérieure à 1200 $\mu\text{S/cm}$;
- la relation conductivité des eaux et nature géologique de terrain d'émergence est difficile à identifier. Les deux sources *Jamaa dix* et *Louzatte* enregistrent des valeurs élevées (1200 $\mu\text{S/cm}$), la forte minéralisation est probablement due au substratum triasique évaporitique ;
- la saisonnalité a une influence sur la distribution temporelle de la conductivité. L'augmentation du débit au printemps s'accompagne d'une baisse des valeurs. Ceci est provoqué par la dilution des eaux : 653 $\mu\text{S/cm}$ pour la source de Zegzel au printemps 2008 contre 76 $\mu\text{S/cm}$ en automne 2008.

3. Teneur en éléments chimiques des eaux des sources étudiées

Dans la mesure où il y a une grande variation des éléments chimiques d'une campagne à l'autre, il s'avère plus pertinent d'étudier les caractéristiques hydrochimiques des sources de chaque campagne, puis de les comparer par la suite.

Le diagramme de Piper (figure 1.40) a été choisi pour représenter les variations saisonnières des différents paramètres physico-chimiques du groupe d'émergences karstiques de la zone d'étude.

3.1. Présentation et interprétations graphiques des sources karstiques

La présentation des échantillons prélevés, permet de définir le faciès chimique des eaux étudiées ; toutes les eaux rentrent dans la catégorie des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (figure 1.40). La concentration en calcium et en magnésium, pour les quatre campagnes, varie selon les sources de 29,2% à 74,2% de la minéralisation totale de l'eau.

Le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ est généralement inférieur à 1 (Annexe 7), ce qui signifie l'abondance de bicarbonate et de calcium. Dans certains cas, le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ est supérieur à 1 (source de Zegzel en printemps 2008 [1,58], Jamaa en automne 2008 [2,94], Tiffasseur en printemps 2009 [3,19] etc.). Cette abondance est liée à la nature dolomitique de l'aquifère liasique et au temps de séjour des eaux. Quand la durée de séjour est longue, le contact des eaux avec les dolomies provoque la concentration en magnésium. Dans la figure 1.40 (diagrammes automne 2008), nous distinguons l'individualisation des eaux caractérisées par une forte concentration en bicarbonate de calcium. Les sources présentant cette concentration sont les sources suivantes : Zegzel, Halouma, Iralouchene, Tarbajjit, Walout et Drawi.

Au printemps 2009 on note l'existence d'un groupe de sources dans lequel la concentration en magnésium est forte (supérieure à 50 %) : Tiffasseur, Tidest, Hajla, Elarbi et Mahdaoui.

La concentration en Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} est moins élevée pour les analyses d'automne, en revanche elle est très élevée pour certaines sources pendant le printemps (Annexe 6). Cette variation est bien illustrée dans la figure 1.40.

La concentration des nitrates n'est pas négligeable dans les eaux analysées, cette présence peut être le signe d'une pollution agricole ; surtout que les valeurs de NO_3^- sont élevées pendant la saison

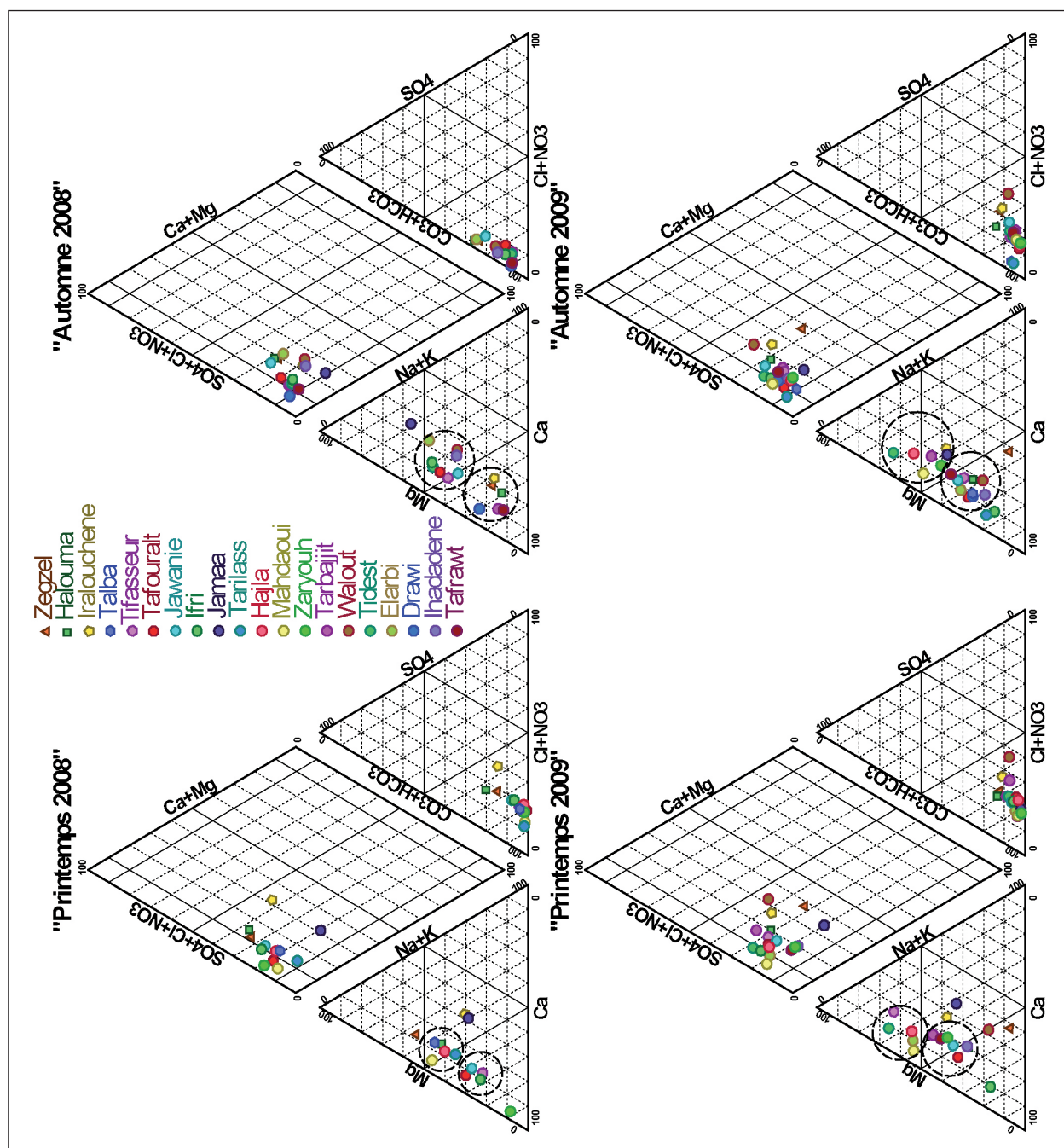


Figure 1.40 : Comparaison des caractéristiques chimiques des eaux des sources karstiques.

agricole (figure 1.39 et 1.40). Les eaux usées domestiques non traitées peuvent être, également à l'origine de cette pollution.

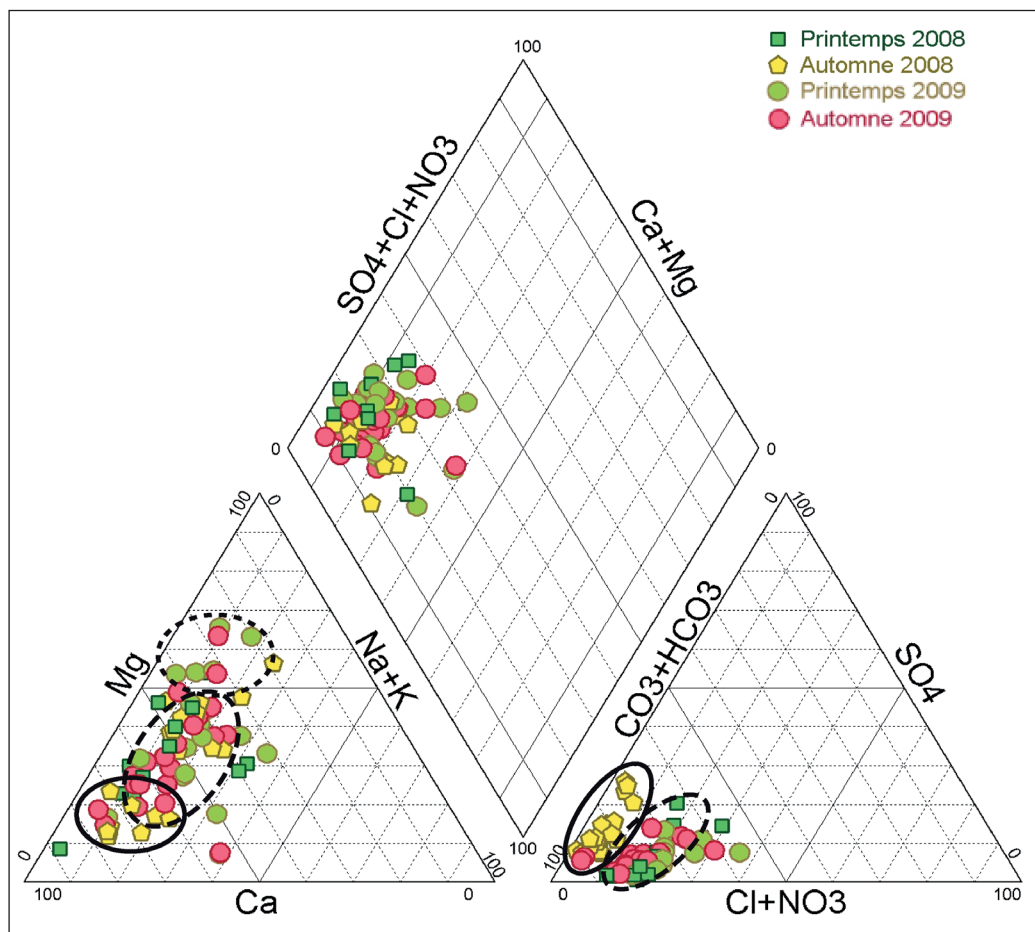


Figure 1.41 : Caractéristiques chimiques des eaux des sources karstiques étudiées.

Le regroupement de quatre campagnes dans le même diagramme (figure 1.41) montre la variation saisonnière des éléments chimiques :

- **printemps** : les résultats mettent en avant la concentration en magnésium et notamment au printemps 2009 (35,5 mg/l pour la source d'Iralouchene par rapport à 27,7 mg/l au printemps 2008). Il est à préciser que le printemps correspond aux hautes eaux après les premières pluies automnales et les pluies d'hiver. Cette concentration reflète le temps long de transit des eaux de pluies. On constate également une concentration élevée en Cl^- (34,9 mg/l pour la source d'Ain Halouma au printemps 2008) et NO_3^- (12,9 mg/l). Ceci est dû aux pratiques agricoles pendant cette saison.
- **automne** les résultats révèlent l'individualisation des valeurs obtenues en automne 2008 et en automne 2009. Ces eaux rentrent dans la catégorie bicarbonatée calcique avec forte concentration en bicarbonate de calcium (104,2 mg/l pour la source d'Ain Halouma en automne 2008) par rapport à seulement 11,6 mg/l en magnésium. Par contre, on note une faible concentration en Cl^- (1,13 mg/l pour la source d'Ain Halouma en automne 2008) et en NO_3^- (10,89 mg/l). Pour expliquer cette variabilité entre les automnes 2008 et 2009, nous avons fait appel aux précipitations. Le total des précipitations enregistrées pendant l'automne 2008 est de 262 mm, par rapport à seulement 82 mm en automne 2009. Il est important de noter que les précipitations d'automne tombent après une période estivale

sèche (19,5 mm en été 2008 et 0 mm en été 2009). Les précipitations d'automne alimentent donc les aquifères karstiques qui sont en période d'étiage. Lors des pluies automnales 2008, la dissolution des bicarbonates de calcium, se traduit par la forte teneur en calcium, en revanche la dilution a donné des valeurs faibles en Cl^- , NO_3^- . On remarque également que les eaux d'automne 2008 sont légèrement sulfatées (87,5 mg/l) par rapport aux mesures effectuées en automne 2009 (47,6 mg/l). Ceci est dû à la dissolution du SO_4^{2-} pendant les précipitations d'automne 2008. Les eaux d'automne 2009, se caractérisent par une concentration en magnésium de 19,8 mg/l par rapport à 11,6 mg/l enregistrées en automne 2008. Cette variation reflète le temps de séjour assez long de ces eaux.

3.2. Présentation des sources non karstiques : basaltiques et schisteuses

La variation saisonnière est observée également dans les diagrammes présentant les résultats des sources basaltiques et schisteuses et croisant les quatre campagnes printemps 2008 et 2009 et automne 2008 et 2009 (figure 1.42) :

- Certaines des sources basaltiques et schisteuses sont chlorurées et sulfatées (Annexe 1.4.2) et notamment les sources suivantes : *Jamaa dix* et *Louzatte* (figure 1.41). La faible minéralisation en Cl^- (2,3 mg/l en automne 2008, par rapport à 102,5 mg/l au printemps 2009 pour la source de *Louzatte*), est marquée pendant les périodes pluvieuses qui se caractérisent par un transit rapide des eaux de pluies (automne 2008 : 262 mm). La baisse des valeurs est due à la dilution et au faible contact des eaux avec le substratum triasique évaporitique. La concentration en sulfates se traduit par la dissolution des SO_4^{2-} , ceci est dû au long contact eaux/roche en place. Les valeurs sont donc plus élevées en printemps. A titre d'exemple, la source *Louzatte* a enregistré 116,6 mg/l au printemps 2009 par rapport à 97,1/l en automne 2008 ;
- A l'intérieur de ce groupe nous trouvons également, des eaux bicarbonatées magnésiennes. Il est probable que ces sources émergent dans des schistes ou des basaltes en drainant des terrains calcaires plus en amont. Le diagramme de Piper présentant les sources émergentes dans le terrain schisteux, met en avant l'individualisation de chaque campagne : certaines eaux analysées pendant l'automne 2009 sont bicarbonatées. En contre partie, certaines eaux traitées (printemps 2008 et 2009 et automne 2008) sont magnésiennes. Ce comportement est lié au temps de séjour de ces eaux en contact avec le calcaire dolomitique malgré l'émergence de ces sources dans des terrains schisteux ou basaltiques ;
- Les résultats confirment la faible teneur en NO_3^- en automne 2008 (0,7 mg/l pour la source de *Lehedarra*) grâce à la dilution due aux précipitations d'un côté et aux faibles intensités des pratiques agricoles de l'autre. On constate l'augmentation de la concentration en NO_3^- pendant les printemps 2008 (26,7 mg/l) et 28,5 mg/l au printemps 2009.

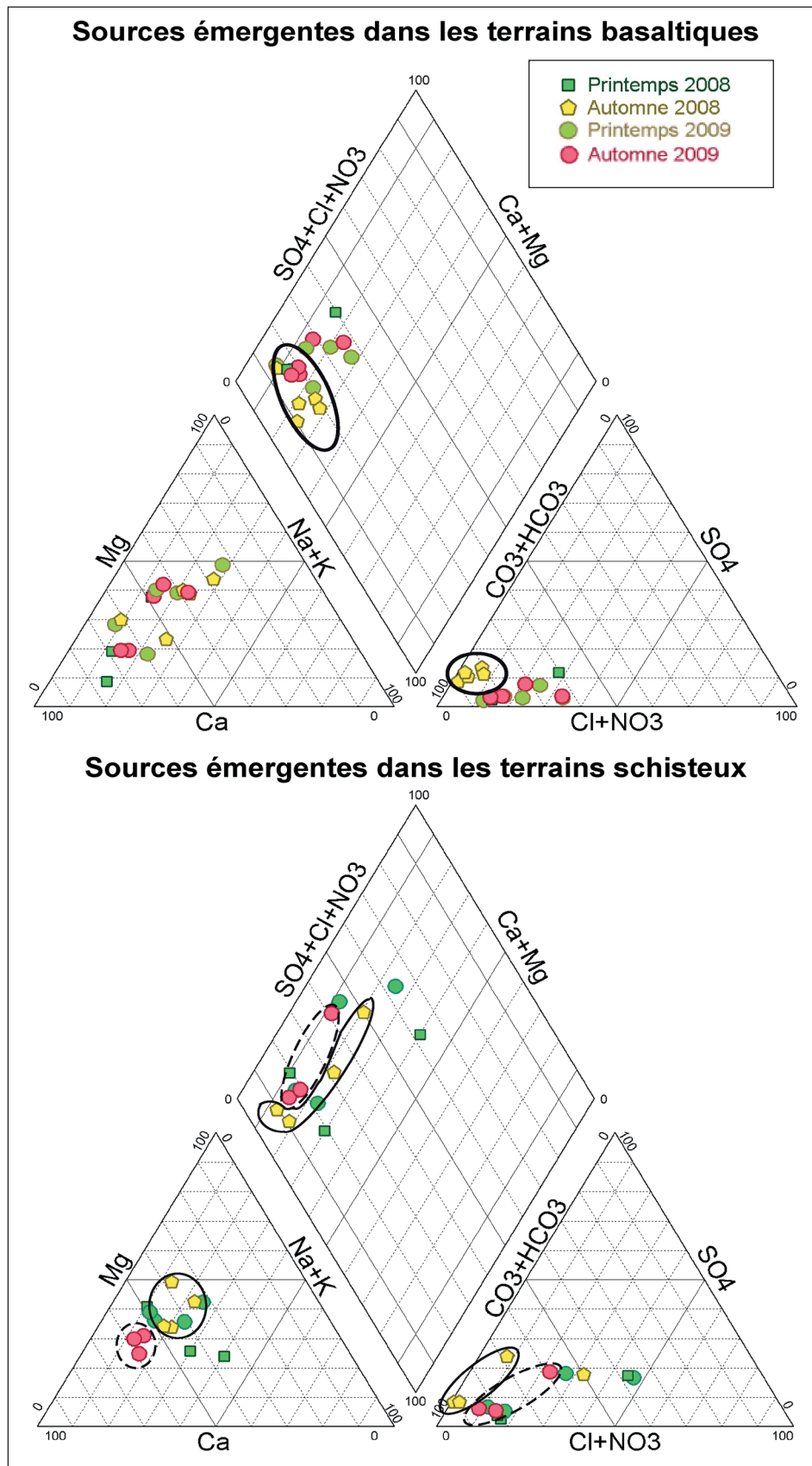


Figure 1.42 : Comparaison des caractéristiques chimiques des eaux schisteuses et basaltiques.

4. Etat de saturation

L'étude de l'état de saturation consiste à déterminer si une eau naturelle est sursaturée, ou sous-saturée, ou bien si elle est en équilibre. Cette étude est importante dans la mesure où elle permet de déceler le comportement actuel des sources et de quantifier la dissolution des carbonates et leur accumulation.

Pour connaître l'état de saturation des eaux des sources karstiques, nous avons fait appel à la méthode de ROQUES (1967) dont les courbes d'équilibre sont basées sur la relation entre pH et le TH. Une eau sous-saturée indique que son transit a été rapide, elle est donc agressive vis-à-vis de la roche calcaire. En revanche, une eau sursaturée indique un écoulement lent qui permet un dégazage de l'eau et par conséquent, une précipitation des carbonates.

La figure.1.43 montre que les eaux rencontrées peuvent correspondre à différents états de saturation.

En règle générale, les points situés dans la zone sursaturée correspondent à des eaux analysées durant la période d'été, dont les apports faibles et les écoulements lents permettent le contact de l'eau avec la roche encaissante. Tandis que les points situés dans la zone sous-saturée correspondent à des eaux échantillonnées durant la période humide, où la recharge importante et les écoulements rapides ne permettent pas un lent contact de l'eau et de la roche.

La majorité des échantillons prélevés en automne 2008, correspondent à des eaux sous-saturées (la période des hautes eaux) avec quelques eaux équilibrées ou proches de l'équilibre, exception faite des eaux de *Tarbajit* qui sont sursaturées. Il est à noter que les précipitations enregistrées durant le mois qui a précédé le prélèvement étaient de 120 mm.

Pour les échantillons prélevés en automne 2009, les eaux sont sursaturées, ce qui correspond à une période d'été. Les précipitations enregistrées durant le mois qui a précédé le prélèvement étaient de 79 mm.

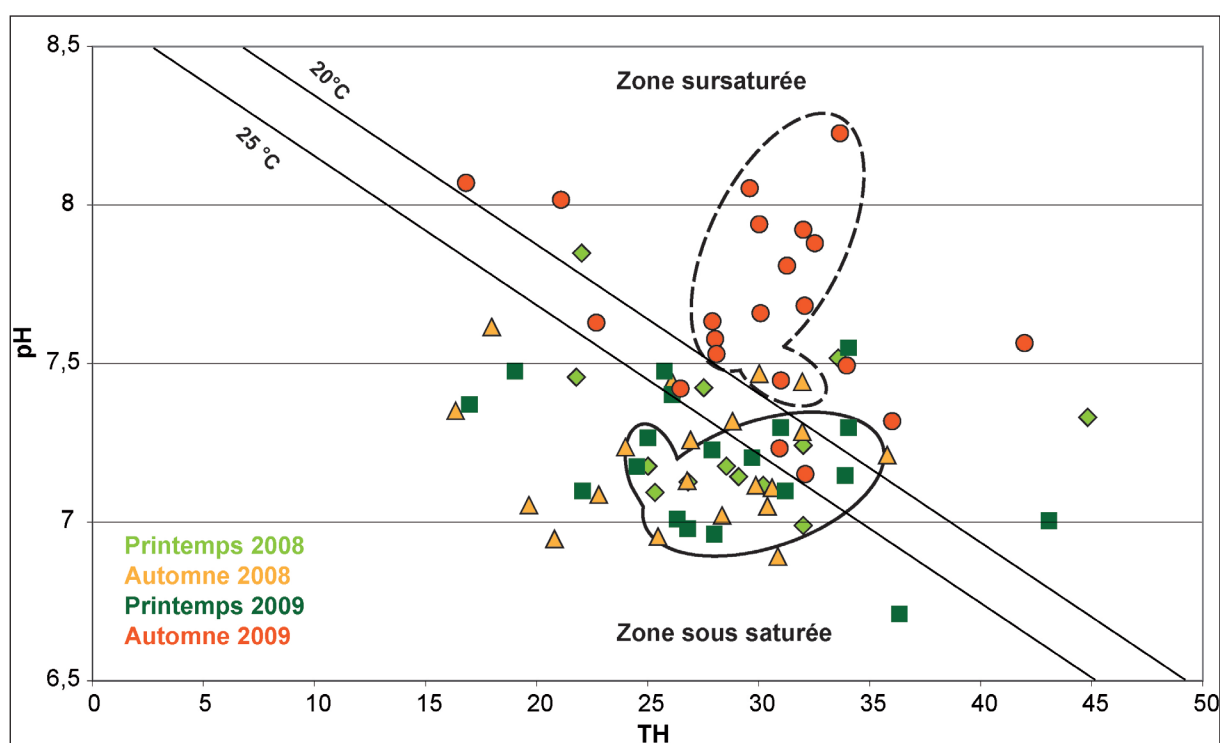


Figure 1.43 : Diagramme d'équilibre (Courbes de Roques) : Etat de saturation des eaux de sources karstiques.

Les eaux prélevées, pendant les printemps 2008 et 2009, sont majoritairement sous-saturées. Le printemps correspond à la période humide. Les écoulements sont généralement rapides ce qui limite leur contact avec la roche encaissante.

5. La turbidité

La turbidité est causée par la présence des matières en suspension composées d'argile, de limon, de particules organiques, etc. Les mesures de la turbidité ont été effectuées sur le terrain, à l'aide d'un turbidimètre portable (photo 1.19). La procédure des mesures est composée des étapes suivantes : après l'étalonnage de l'appareil, remplir la cuvette, la fermer, bien essuyer la surface extérieure afin de ne pas erroner les mesures, placer la cuvette dans le puit de mesure et enfin relever le résultat quand le signal se stabilise.



Photo 1.19 : Turbidimètre infrarouge « Merck »

Les résultats obtenus à partir des mesures de la turbidité des sources suivies, ont montré que généralement, après les grandes averses, les sources étudiées connaissent des épisodes de turbidité qui modifient la composition et la qualité des eaux. Le tableau 1.5, regroupe les données récoltées sur le terrain. Le manque de bases de données complètes ne permet pas d'appréhender la relation turbidité/averse. Les données présentées dans le tableau ont été effectuées de manière ponctuelle.

L'observation du tableau 1.5 permet de relever les points suivants :

- en temps normal la turbidité des sources varie de 0 à 2,8 NTU ;
- en temps normal les sources karstiques sont moins turbides par rapport aux sources qui émergent dans les basaltes et les schistes ;
- augmentation des valeurs de la turbidité après l'averse de l'automne 2008, par exemple les eaux de la source de *Zegzel* sont passées de 0,57 NTU avant l'averse à 7,22 après l'averse ;
- la turbidité est due aux averses violentes, à l'écoulement rapide des eaux souterraines, et à la fragilité et la dégradation des sols ;
- la source d'Ain Awlout est marquée par des valeurs plus faibles après les averses, par exemple avant l'averse automne 2008 la turbidité était de 2,8 NTU, après l'averse la turbidité baisse pour atteindre 1,1 NTU. La baisse de la turbidité peut être expliquée par

Nom	Automne 2008		Printemps 2009	
	Avant la crue	Après la crue	Sans crue	Faibles averses
Zegzel	0.57	7.22	0	0.45
Halouma	0.98	Pas de données	0.01	0.04
Iralouchene	1.11	Pas de données	0.74	0.53
Talba	1.66	Pas de données	0	0.13
Tiffasseur	0.8	Pas de données	0	0.01
Tafouralt	0.7	Pas de données	0	0.06
Jawanie	0.62	Pas de données	0	0
Ifri	0.61	3.49	0	0.39
Jamaa	2.26	7	0.23	0.29
Tarilass	0	3.64	0	0.32
Hajla	0.56	Pas de données	0	1.55
Mahdaoui	10.67	Pas de données	0.16	3.12
Zaryouh	0	Pas de données	0	0.11
Tidest	0.77	Pas de données	1.32	0
ElArbi	6.55	Pas de données	0	1.02
Walout	2.79	1.11	0.67	0.6
Jemel	0.84	0	0	0.07
Drawi	0	3.06	0	0.24
Ihadadene	0	8.4	0.31	0.2
Tafrawt	0	2.73	0.24	0.37
Tarbajjit	0.61	0	0	0.04
Tardanaj	6.82	0	1.43	0.84
Mahlou	0	1.54	0	0.86
Boubzar	0	0.55	0	0.45
Lahedarra	0	7.24	0	0.01
Madrara	3.31	0	0.81	0.68
Jamaa Dix	1.24	3.02	0	
Lahri	3.02	0	0.94	0.17
Louzzate	1.18	0	0	0
Source	5.02	0	2.69	0.07

En rouge : valeurs élevées de la turbidité, en bleu : sources karstiques, en jaune : sources issues des basaltes et en orange sources issues des schistes.

Tableau 1.5 : Turbidité de certaines sources suivies (NTU).

« l'effet chasse d'eau », une caractéristique de certaines sources karstiques dont les eaux stockées (et qui ont eu le temps de déposer les particules suspendues) se font chasser par la nouvelle arrivée des eaux de pluie.

Il est à noter que les recommandations internationales suggèrent que la turbidité ne devrait jamais dépasser 1 NTU (Fondation David Suzuki, 2006). Ceci signifie que les eaux souterraines du massif des Béni Snassen sont hors normes pendant les périodes d'averses.

6. Débit des sources

Le débit des sources du massif des Béni Snassen n'a pas été suivi en continu. Les jaugeages de certaines sources s'effectuent exceptionnellement pendant les hautes eaux par l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHM) (figure 1.44). Les sources jaugées sont les sources les plus accessibles (exemple la source d'Awlout). Les données de débits sont donc rares et lacunaires. Les photos 1.20 illustrent les sources du massif des Béni Snassen : un débit très élevé pendant les hautes eaux. A titre d'exemple la source d'Ain Awlout a enregistré 1 023 l/s le 24/03/1995.

Les jaugeages en période d'étiage permettent d'appréhender les caractéristiques des ressources en eau souterraine et d'étudier l'organisation des écoulements issues de la vidange aquifère (NEJJARI et al., 2000). L'absence de ces données ne permet pas de montrer la complexité de l'organisation spatiale des écoulements et d'appréhender les ressources en eau karstique en milieu semi-aride.

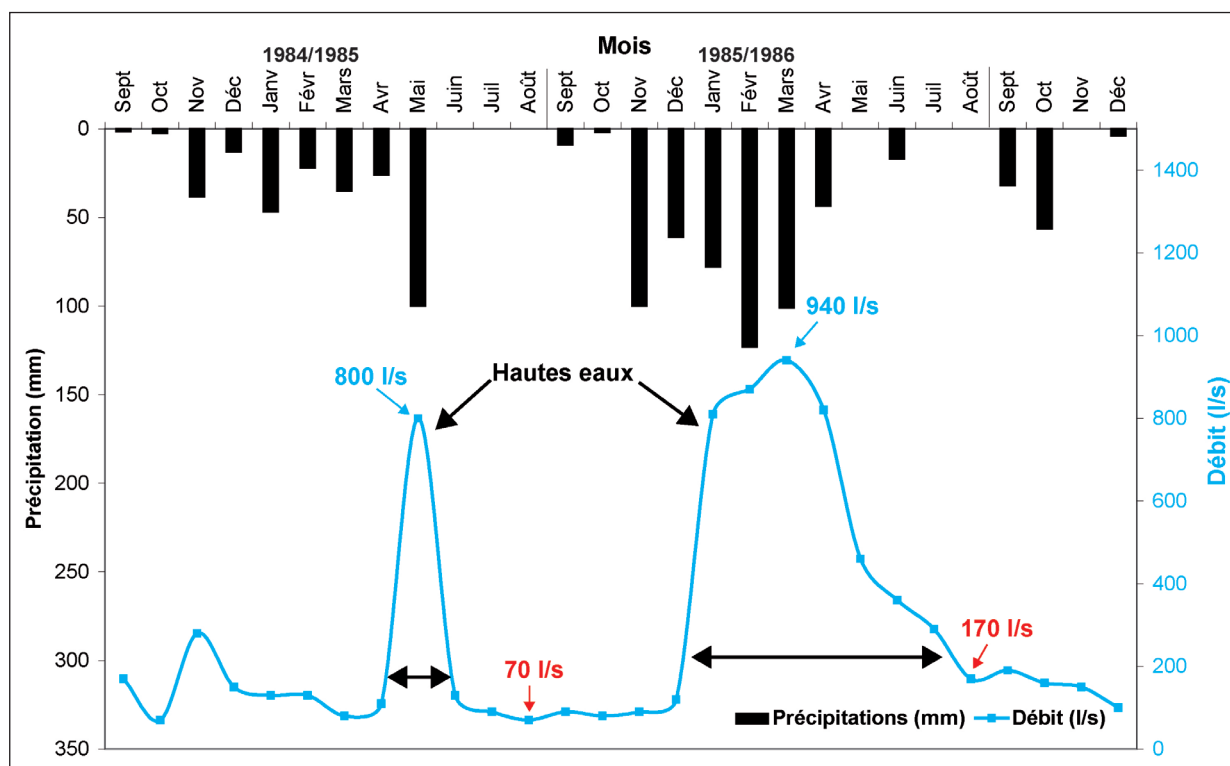
6.1. Variations mensuelles : exemple de la source de Zegzel

Dans ce travail, les seules données disponibles sont les mesures effectuées par GHAZI dans le cadre de sa thèse (GHAZI, 1987). Ces mesures couvrent la période qui s'étale de septembre 1984 à décembre 1986.

La figure 1.44 met nettement en évidence la relation précipitations/débit. L'observation de la figure, montre que les débits élevés correspondent aux périodes humides et inversement. Pendant l'année hydrologique (1984/1985), le débit de la source de Zegzel est resté assez faible pendant la



Photo 1.20 : Sources « Ain Awlout » et « source de la grotte du Chameau » en crue et en étiage.



D'après les données de (GHAZI, 1987)

Figure 1.44 : Moyenne mensuelle du débit de la source de Zegzel et des précipitations d'Ain Almou (1984/1986).

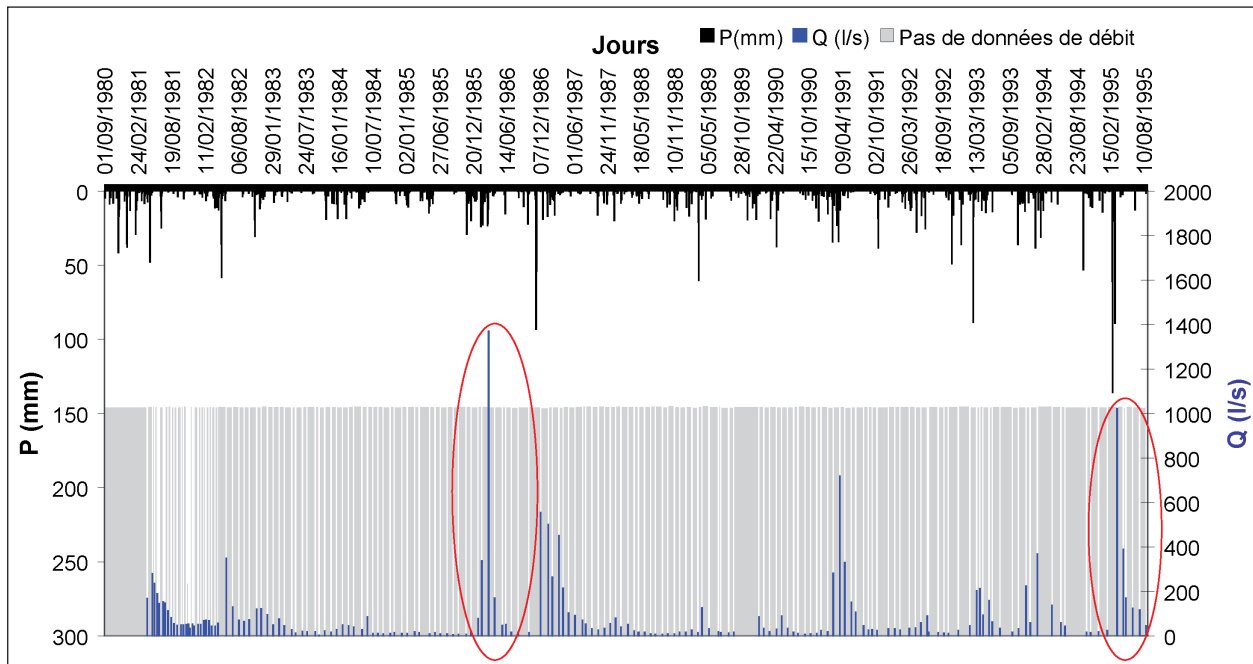
période hivernale et printanière (exemple 80 l/s en mars 1984). Ceci est lié aux faibles précipitations (47 mm en janvier, 22 mm en février, 25 mm en mars et 26 mm en avril). En mai 1985 le débit atteint 800 l/s grâce aux précipitations enregistrées ce mois-ci : 100 mm. L'année 1985/1986 a enregistré plus de pluies que à l'année précédente (535 mm/an), ceci a eu des conséquences sur l'écoulement souterrain. La période des hautes eaux débute en janvier (810 l/s) pour finir en juin (360 l/s). Le débit le plus élevé a été enregistré en mars 1986 (940 l/s).

L'observation de la courbe du débit montre le maintien de l'écoulement malgré l'absence de précipitations : 70 l/s au mois d'août 1985 et 190 l/s en août 1986. L'écoulement permanent de la source explique l'existence d'un stock important qui l'alimente pendant la période d'étiage.

Ce comportement hydrologique est le cas général des sources karstiques méditerranéennes qui se caractérisent par des hautes eaux pendant les périodes pluvieuses et par de longs tarissements qui peuvent se prolonger jusqu'au cours de la période printanière (le cas de l'année 1984/1985).

6.2. Variations journalières : exemple de la source d'Ain Awlout

Pour traiter la relation débit/précipitations à l'échelle journalière, nous nous basons sur la série de jaugeages des années 1980/1995 de la source d'Ain Awlout, effectuée par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM). La figure 1.45 montre que les mesures sont réalisées d'une manière ponctuelle (les jours sans données sont en gris), ce qui empêche une visualisation continue de la relation débit/précipitations. L'observation du graphe met en évidence une corrélation assez cohérente entre le débit et les précipitations, par exemple le 24 mars 1995 le débit de la source a atteint 1 023 l/s après un épisode pluvieux dont les jours les plus arrosés ont les valeurs suivantes : 61 mm le 27 février, 136 mm le 28 février et 89 mm le 13 mars. La figure permet également de caractériser le régime hydrogéologique de la source d'Awlout comme un régime pluvial avec deux



Source : (ABHM)

Figure 1.45 : Corrélation du débit journalier de la source d'Awlout et des précipitations de la station de Berkane (1980/1995).

périodes hydrogéologiques bien marquées : une période de hautes eaux et une période de basses eaux. La valeur enregistrée le 11 mars 1986 qui atteint 1 369 l/s laisse supposer une erreur de mesure car l'avant dernière mesure effectuée date du 3 février 1986 dans laquelle le débit a été de 338 l/s, les précipitations enregistrées entre les deux mesures (soit 37 jours) sont de seulement 127 mm ce qui ne peut pas expliquer un débit aussi élevé.

Conclusion

Les données recueillies restent ponctuelles et ne permettent donc pas de faire une étude détaillée à l'échelle d'une année hydrologique et de comprendre le fonctionnement des aquifères karstiques. Cette étude consiste à évaluer la composition physico-chimique des eaux souterraines du massif des Beni Snassen orientaux et permet de caractériser ces eaux en fonction de la nature lithologique des terrains qu'elles traversent.

L'analyse et le traitement des eaux prélevées permettent de tirer les conclusions suivantes :

- variabilité saisonnière de la température des eaux des sources. Les eaux karstiques se caractérisent par des températures élevées (25°C pour *Zegzel*, 23°C pour *Ain Halouma*) par rapport aux eaux basaltiques et schisteuses. Ceci signifie l'importance et la profondeur des aquifères karstiques ;
- les eaux karstiques rentrent dans la catégorie des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Les pratiques agricoles et domestiques provoquent une augmentation de la concentration en nitrate ce qui provoque une pollution ponctuelle des eaux ;
- des variations très marquées des paramètres physico-chimiques des eaux des sources ont été observées, selon la période de prélèvement : la saisonnalité joue un

rôle important dans la définition de ces paramètres. Pendant les périodes d'étiages, les eaux analysées correspondent généralement aux eaux sursaturées. Pendant les périodes humides, les eaux sont majoritairement sous-saturées ;

- influence de la nature géologique du terrain d'émergence dans la caractérisation des eaux. Les analyses et le traitement de données livrent des indices qui permettent la comparaison entre les différentes sources qui correspondent aux différents substrats rocheux. Les sources qui sont en contact avec les roches Permo-Triasiques présentent une forte concentration en éléments salins. Les eaux karstiques présentent une forte concentration en bicarbonates de calcium et de magnésium ;
- Les caractéristiques hydrochimiques des sources karstiques sont très variables suite à la complexité structurale du massif et au compartimentage de cet aquifère ;
- la turbidité des eaux souterraines augmente après les averses violentes ;
- le débit des sources du massif des Béni Snassen est intimement lié aux précipitations. Les hautes eaux correspondent aux périodes humides et inversement. L'existence d'un important « stock karstique » assure l'écoulement des sources contrairement aux sources temporaires qui se caractérisent par un tarissement annuel.

Les bassins d'alimentation karstiques (BAK) ainsi que le mode et le fonctionnement des eaux souterraines restent inconnus. Un suivi de prélèvements et de mesures est nécessaire pour comprendre l'organisation du système karstique et pour mener à bien une étude hydrogéologique du massif.

Le manque de délimitations des bassins d'alimentations karstiques, une information primordiale dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques, va conditionner l'échelle du terrain d'étude et l'approche de notre réflexion.

CHAPITRE 2

PARAMÈTRES VARIABLES DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES »

2.1. PARAMÈTRE « PRÉCIPITATIONS »

Le paramètre précipitation constitue un des paramètres essentiels de l'alimentation des aquifères karstiques. La quantité et l'intensité des précipitations sont des facteurs importants pour appréhender et mettre en avant les influences directes et indirectes de la variable « précipitation » sur les différents sous systèmes qui composent le système « vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen ».

Pour apprécier l'irrégularité importante entre les années déficitaires et les années normales, différentes méthodes ont été appliquées dans les analyses statistiques des données. Le manque de séries complètes de données statistiques constitue un réel handicap pour la réalisation d'une étude comparative pertinente. Ce manque est dû à la difficulté d'accès aux données. Celles-ci sont généralement incomplètes et lacunaires. Comme la plupart des zones montagneuses, dans les pays en voie de développement et notamment au Maroc, le massif des *Béni Snassen* souffre d'une insuffisance de stations climatiques et d'une irrégularité des relevés effectués. La température n'est pas abordée à cause du manque de base de données, ce qui limite la réalisation d'une étude globale de l'aspect climatique.

1. Pluviométrie de la région nord orientale du Maroc

En raison de sa position en marge sud-ouest de la Méditerranée, la région orientale du *Maroc* se trouve en climat typiquement méditerranéen. Les pluies y proviennent des perturbations atlantiques (Açores), et des perturbations méditerranéennes (liées à l'arrivée des masses d'air froid du nord), qui sont moins fréquentes mais généralement plus humides que les premières. Cette région se trouve également sous l'influence des pressions sahariennes, qui sont à l'origine du chergui¹ et du sirocco², vents chauds et secs du Sud et du Sud-Est (DAKKI, 2003).

La diversité des reliefs et la grande étendue de la région considérée font que le climat est variable d'un endroit à un autre. Néanmoins, on peut distinguer deux zones climatiques bien distinctes :

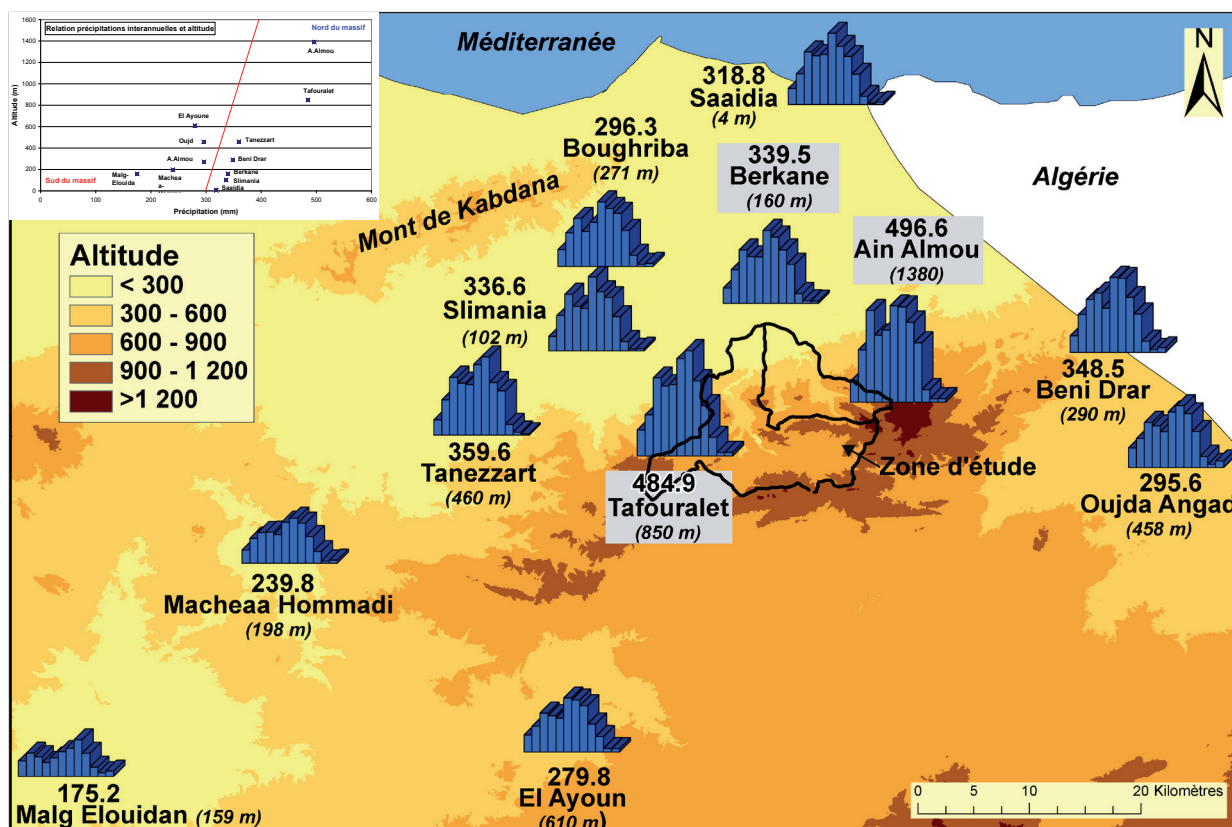
- la marge méditerranéenne : située au nord, caractérisée par un climat semi-aride avec deux saisons bien contrastées : un hiver doux et peu pluvieux allant d'octobre à mai et un été sec et chaud s'étalant de juin à septembre.
- le reste de la région : caractérisé généralement, par un climat aride où les précipitations sont très faibles et où la période sèche s'étale sur une grande période de l'année. Les hivers y sont souvent rigoureux, longs et froids, marqués parfois par des températures minimales négatives alors que les étés sont très chauds.

La région orientale, située à l'est des hautes barrières montagneuses du Moyen Atlas et du Rif, se trouve relativement abritée des perturbations provenant de l'Atlantique. Le massif des *Béni Snassen* possède les reliefs les plus élevés de la région orientale, ce qui explique les précipitations élevées (à l'échelle de la zone d'observation) des stations situées en altitude, en revanche, il empêche les pluies d'origine méditerranéennes de pénétrer vers le Sud (figure 2.1).

La figure 2.1 (diagramme de corrélation) montre que les stations les plus arrosées se trouvent en altitude : 496 mm/an pour la station d'*Ain Almou* qui se trouve à une altitude de 1380m, et 484 mm/an pour la station de *Tafouralet* dont l'altitude est de 830 m. Par ailleurs, les *Béni Snassen* servent, également, d'écran aux vents chauds et secs du Sud-Est et du Sud ce qui explique que les stations pluviométriques de *Malg Elouidan*, *El Ayoun* et *Oujda* enregistrent une pluviométrie inférieure à

1. Un vent chaud venant du Sahara

2. Un vent saharien violent, très sec et très chaud qui souffle sur l'Afrique du Nord et le sud de la mer Méditerranée.



Source : Météo Maroc

Figure 2.1 : Répartition pluviométrique de la région orientale du Maroc (moyenne interannuelle 1971/1999).

300 mm/an en moyenne : 175 mm, 279 mm et 295 mm respectivement.

2. Pluviométrie du massif des Béni Snassen

2.1. Equipements météorologiques

L'analyse des données pluviométriques retenue dans le cadre de ce travail, est centrée sur les stations de *Berkane*, *Tafouralet* et *Ain Almou*. La première station est située en plaine au nord des bassins versants de Zegzel et Béni Ouaklane, les deux autres encadrent ces derniers et se trouvent en montagne (figure 2.1). Il est important de signaler que le rôle de la neige est négligeable dans la région.

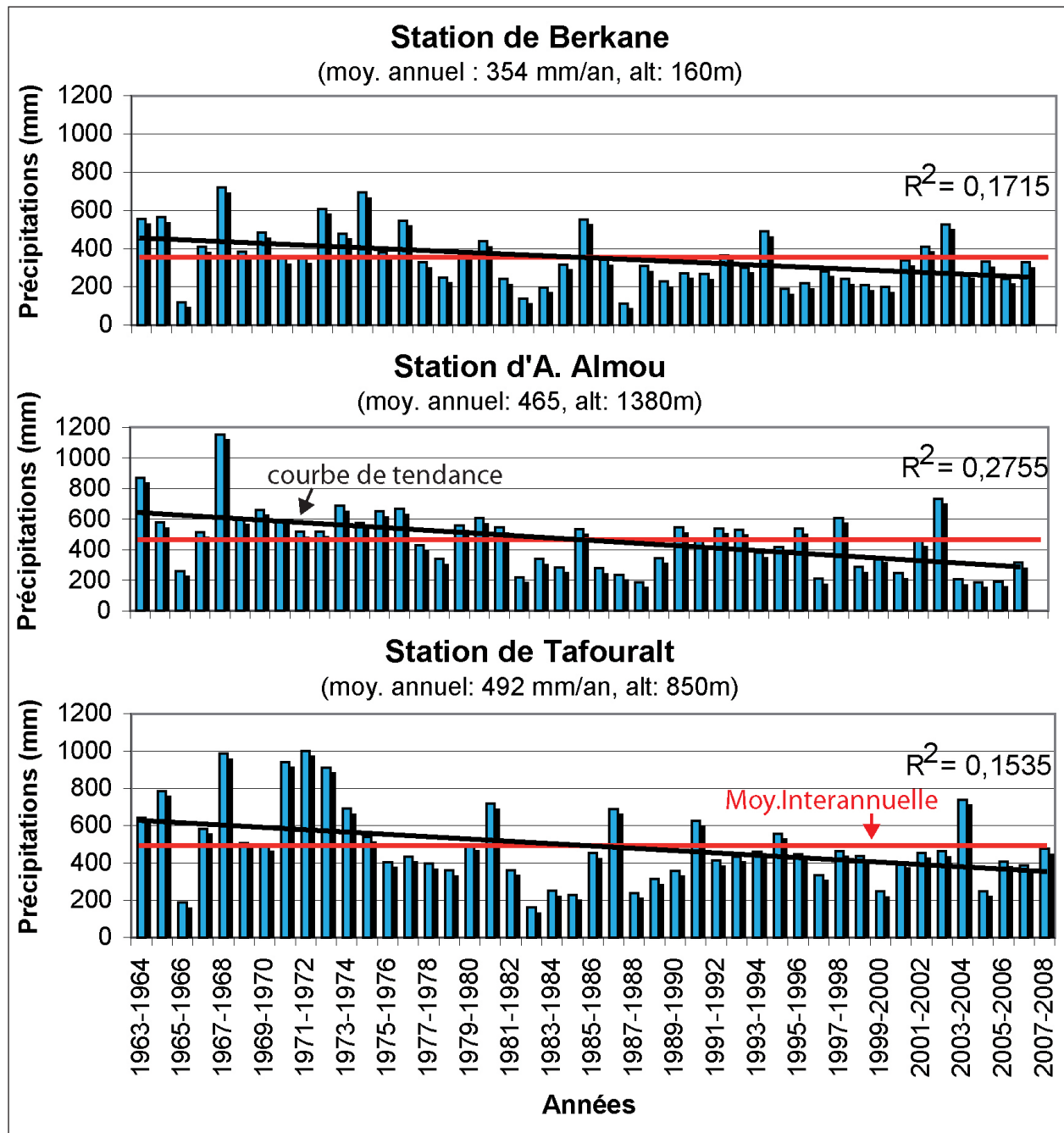
2.2 .Analyse statistique des données pluviométriques

Variations interannuelles

L'étude des précipitations moyennes interannuelles met nettement en évidence une grande variation spatiotemporelle des trois stations (figure 2.2). La station de *Berkane* est la moins arrosée en raison de sa situation en plaine (160 m). Pour les deux stations de montagne : *Tafouralet* enregistre la moyenne interannuelle la plus élevée (850 m) par rapport à *Ain Almou* (1 380 m). Cette variation est influencée par la localisation ouest de *Tafouralet*.

Les modules pluviométriques interannuels montrent, également, une forte irrégularité d'une

année à l'autre. Les années humides sont généralement séparées par de longues périodes de sécheresse. Environ 70% des précipitations annuelles sont inférieures à la moyenne mensuelle interannuelle. Pendant la période d'observation, les précipitations maximales ont été enregistrées au cours de l'année hydrologique (1967/1968) atteignant 1 153 mm à *Ain Almou*, 986 mm à *Tafouralet* et 719 mm à *Berkane*. L'année 1987/1988 est la plus sèche de la période d'observation pour la



Source : Météo Maroc

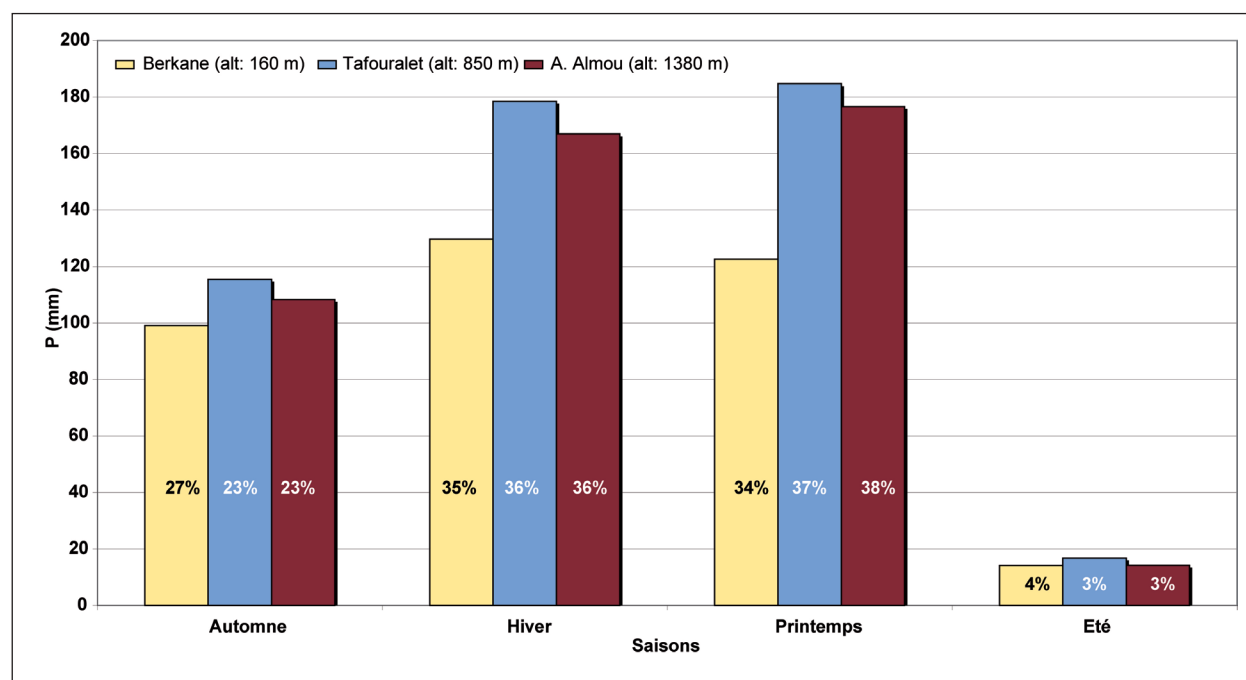
Figure 2.2 : Précipitations moyennes interannuelles (1963/2008).

station de *Berkane* avec 113 mm. En revanche pour *Tafouralet* et *Ain Almou* l'année 1982/1983 est la plus sèche avec 161 mm et 241 mm respectivement. La figure 2.2 montre également une baisse remarquable des précipitations pour les trois stations, sur l'ensemble de la chronique.

Variations saisonnières

L'étude des précipitations moyennes saisonnières permet de mettre en évidence l'existence d'un régime pluviométrique à deux saisons contrastées (figure 2.3). Les stations de *Tafouralet* et *Ain Almou*, ont reçu au printemps, pendant la période d'observation (1963/2009), 37% et 38% respectivement des pluies totales. Ceci correspond à 185 mm pour *Tafouralet* et 177 mm pour *Ain Almou*. En hiver, les stations de montagne ont enregistré 36% de la totalité des pluies (179 mm pour *Tafouralet* et 167 mm *Ain Almou*). 23% a été relevé en automne pour ces deux stations (116 mm pour *Tafouralet* et 108 mm pour *Ain Almou*). L'été représente une saison quasiment sèche avec seulement 3% des pluies enregistrées.

En ce qui concerne la station de *Berkane*, la saison d'hiver représente la saison la plus humide avec une moyenne saisonnière interannuelle de 130 mm ce qui correspond à 36% des pluies. Le



Source : Météo Maroc

Figure 2.3 : Pluviométrie saisonnière interannuelle (1963/2008).

printemps enregistre un pourcentage de 35% soit 123 mm. L'automne représente 27% des pluies ce qui correspond à 90 mm. Enfin l'été est également très sec pour la station de *Berkane* (4% des pluies enregistrées).

L'apport pluvial est donc élevé pendant l'hiver et le printemps. Il constitue un ensemble de 74% de la lame d'eau tombée annuellement pour *Tafouralet* et *Ain Almou* et 69% pour *Berkane*.

Variations mensuelles

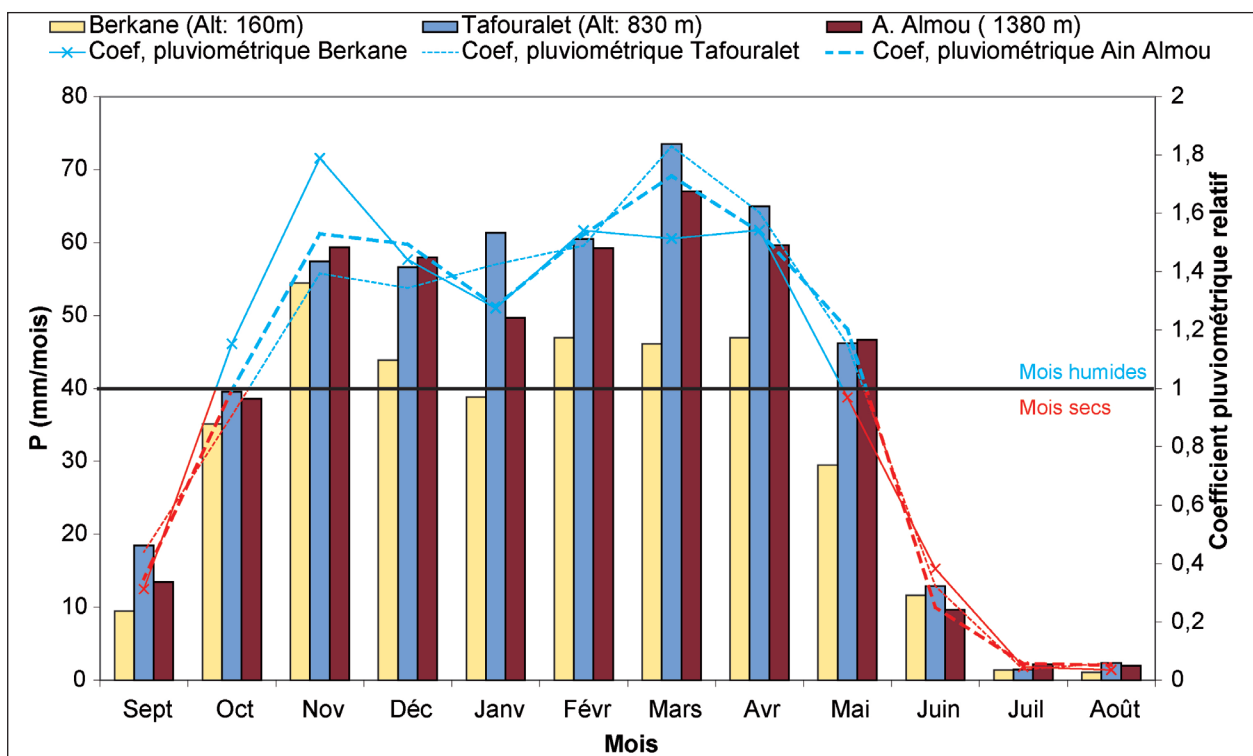
L'examen de la figure des précipitations moyennes mensuelles et les coefficients pluviométriques (1963/2009) (figure 2.4) permet de relever l'irrégularité du régime pluviométrique d'un mois à un autre. Le mois de mars est le mois le plus arrosé pour les deux stations de montagne (*Tafouralet* et *Ain Almou*) avec 75 mm/mois et 67 mm/mois respectivement.

Le mois de novembre représente le mois le plus arrosé pour la station de plaine (*Berkane*) avec une moyenne mensuelle interannuelle de 54 mm/mois.

Dans la figure 2.4, nous avons croisé les précipitations moyennes mensuelles interannuelles avec le coefficient pluviométrique relatif (rapport entre la quantité de pluie qui tombe réellement dans un mois et celle qui serait tombée si la pluie avait été répartie uniformément durant toute l'année) (MUSSET, 1935). Le coefficient pluviométrique permet de mieux apprécier l'inégalité mensuelle des pluies enregistrées durant les différents mois.

Les coefficients supérieurs à 1 correspondent à des mois recevant plus que leur part de pluie (mois humides), ceux inférieurs à 1 au contraire correspondent aux mois secs (MUSSET 1935).

Dans notre étude de cas, on distingue à première vue les mois humides (de octobre à avril) pour la station de *Berkane* avec un pic de 1,8 au mois de novembre. Pour les deux autres stations de montagne, la période humide va de novembre à mai pour *Tafouralet*, et d'octobre à mai pour *Ain*



Source : Météo Maroc,

Figure 2.4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1963/2008).

Almou, soit un mois de plus par rapport aux autres stations, ceci est lié à la situation géographique de la station (1 380 m d'altitude). Ces deux stations enregistrent un pic humide en mars de 1,8.

Les mois secs couvrent le reste de l'année. Le mois d'août est le mois le plus sec pour les deux stations : *Berkane* (0,04) et *Ain Almou* (0,05). Tandis que le mois de juillet correspond au mois le plus sec pour la station de *Tafouralet*.

Variations journalières

Pour ce paramètre, et pour mieux apprécier cette irrégularité pendant les dernières années, nous menons une étude comparative des données statistiques couvrant la période (2000/2009), des trois stations (*Berkane*, *Tafouralet* et *Ain Almou*).

La figure 2.5, illustre la concentration des pluies sur quelques jours de l'année : dans la plupart des cas les jours de pluies correspondent à la saison humide (de novembre à mai).

Pendant cette période d'observation (2000/2009), les valeurs maximales sont enregistrées le 15/03/2004 : 71,8 mm pour *Berkane*, 304 mm pour *Tafouralet* et 309 mm pour *Ain Almou*.

L'année 2004/2005 est l'année la plus humide avec 588 mm enregistrés pendant 34 jours pour la station de *Berkane*, 750 mm sur 41 jours de pluie à *Tafouralet* et 780 mm sur 29 jours de pluie à *Ain Almou*.

En revanche, l'année la plus sèche est celle de 2000/2001 pour la station de *Berkane* avec 194 mm enregistrés pendant 37 jours. Pour les deux autres stations l'année 2005/2006 est considérée comme l'année la plus sèche avec une moyenne annuelle de 223 mm sur 23 jours à *Tafouralet* et 188 mm sur 46 jours pour *Ain Almou*.

La moyenne mensuelle des jours de pluie est de 4 jours pour la station de *Berkane* et de 3 jours pour les deux stations de montagne. Tandis que la moyenne interannuelle est de 38 jours pour la station de *Berkane* et *Ain Almou* et de 40 jours pour la station de *Tafouralet*.

2.3. Intensité pluviométrique

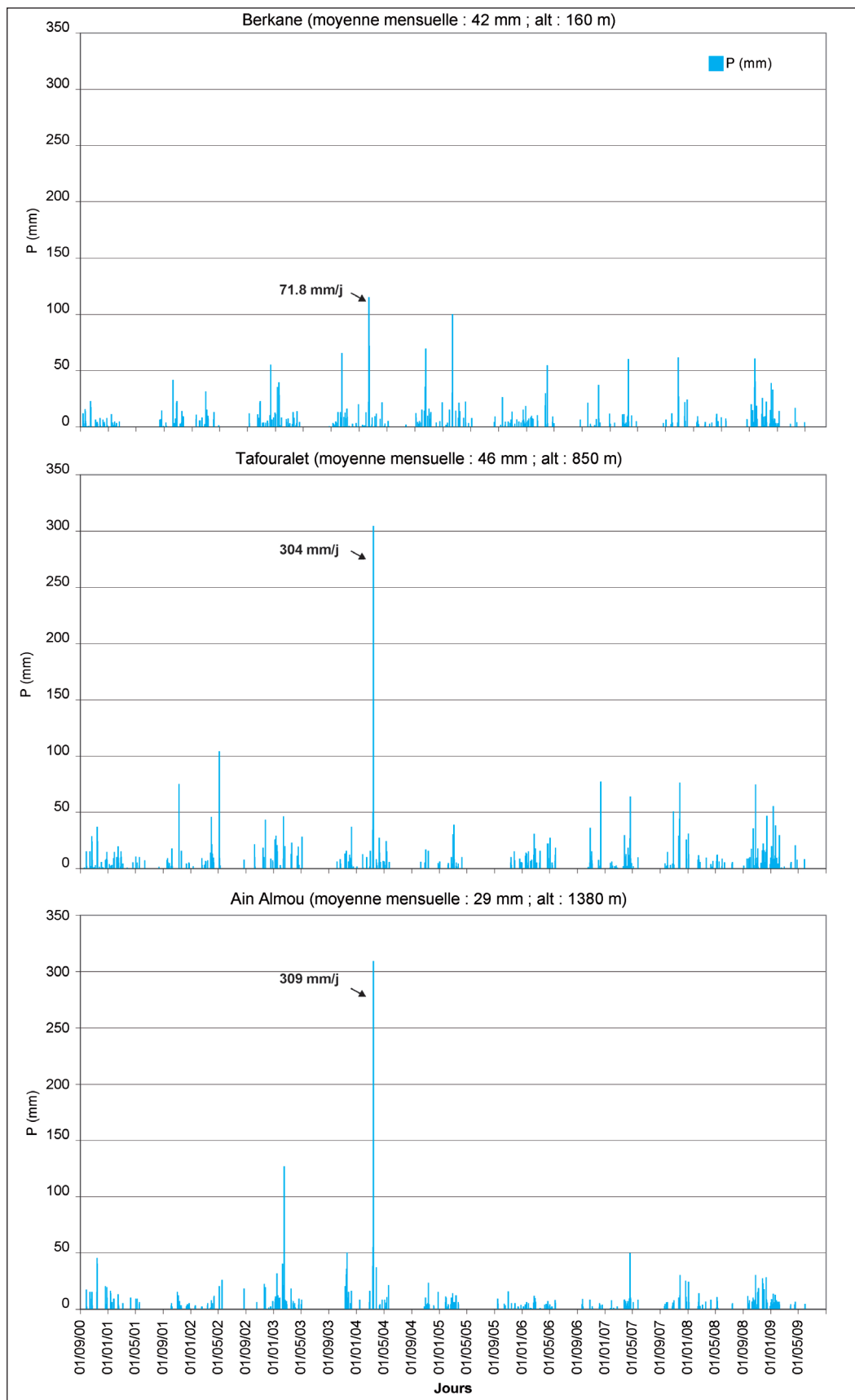
Le coefficient de l'intensité pluviométrique est obtenu par l'application de l'équation suivante : somme de précipitations mensuelles / nombre de jours de pluies par mois. La figure 2.6, montre que les précipitations sont réparties sur un petit nombre de jours, ce qui se reflète par une intensité pluviométrique élevée.

Les averses violentes et brutales sont séparées par des longues périodes sans pluie au sein même de cette période humide. Le graphe de la figure 2.6, illustre pour sa part, l'absence totale de précipitations pendant la saison estivale (de juin à août).

Le manque de données sur l'intensité horaire ne nous permet pas hélas, d'effectuer une étude détaillée sur l'intensité et la durée des averses.

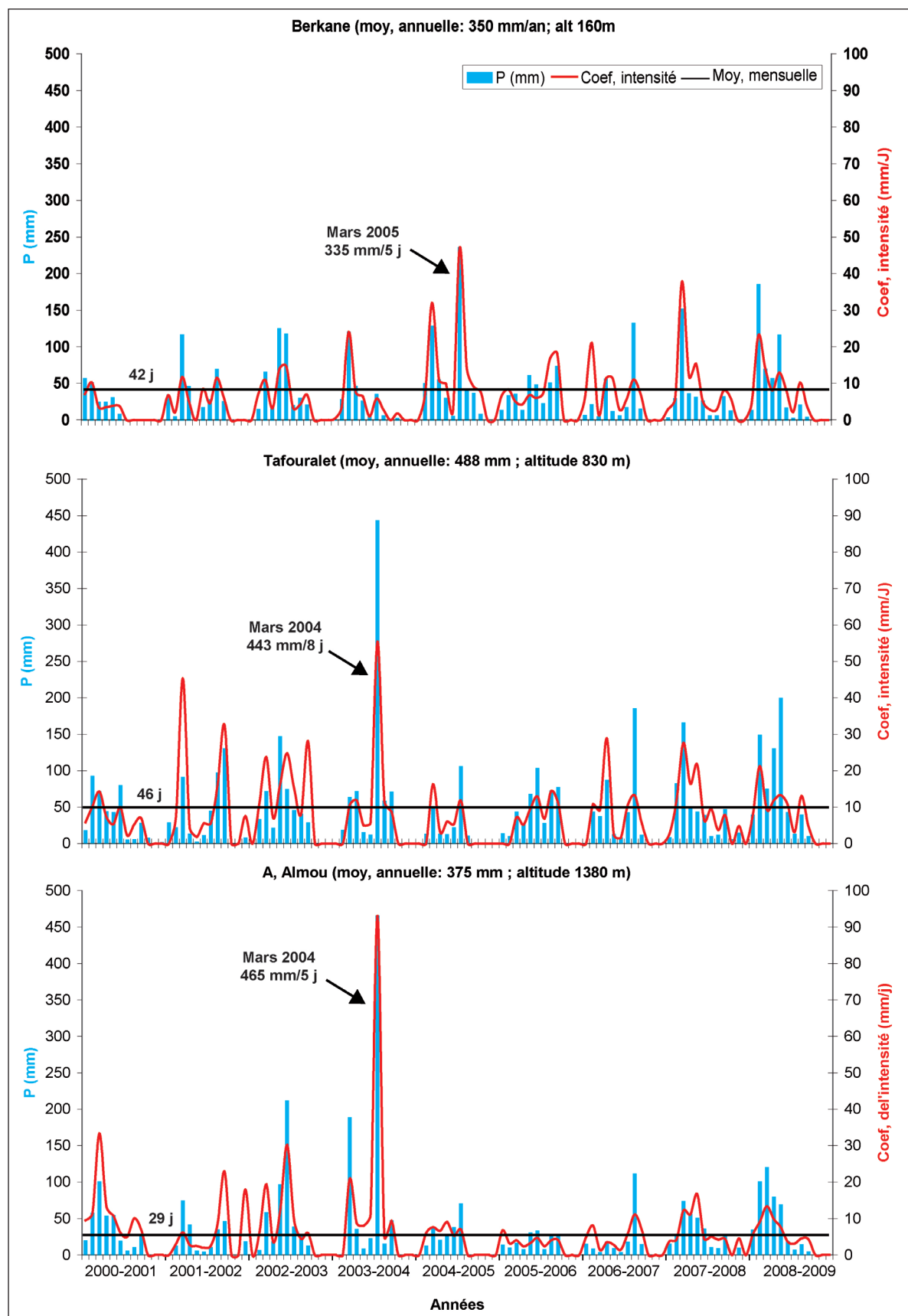
La première remarque qui peut être tirée de l'observation de la figure 31, est la faible intensité pluviométrique pour la station de *Tafouralet* (55,38) par rapport à *Ain Almou* (93). Cette différence est due à la forte concentration et la brutalité des pluies journalières pour la station d'*Ain Almou*. A titre d'exemple, en mars 2004, *Ain Almou* a enregistré 465 mm en 5 jours par rapport à 443 mm en 8 jours pour *Tafouralet*.

La station de *Berkane* est également caractérisée par une concentration des pluies sur quelques jours : en mars 2004, 335 mm ont été enregistrés en 5 jours, avec une intensité pluviométrique de 47,1.



Source : Météo Maroc

Figure 2.5 : Pluviométrie journalière de Berkane, Tafouralet et A. Almou (2000/2009).



Source : Météo Maroc

Figure 2.6 : Intensité pluviométrique de Berkane, Tafouralet et A. Almou (2000/2009).

Pendant la période d'observation 2000/2009, la moyenne de jours de pluies des trois stations (*Berkane, Tafouralet et Ain Almou*) a été de 42, 46 et 29 jours pour une moyenne interannuelle de 350, 488 et 375 mm/an respectivement.

3. Indice standardisé de sécheresse pluviométrique

Pour caractériser et identifier les conditions climatiques, plusieurs méthodes et indices ont été utilisés à différentes échelles de temps : mensuelles, saisonnières et annuelles, par exemple : RNP (Rapport à la Normale des Précipitations), ISP (Indice Standardisé des Précipitations), ISSP (Indice Standardisé de Sécheresse Pluviométrique) (BORDI *et al.*, 2001; LOPEZ *et al.*, 2006; PITA, 2001; ROGNON, 1996; STOUR *et al.*, 2009). Dans notre cas d'étude nous allons appliquer « ISSP » (PITA, 2001).

3.1. Calcul de l'ISSP

Cet indice est fondé sur l'utilisation des précipitations mensuelles comme données de base. Il repose sur l'accumulation des anomalies successives pour essayer d'identifier les différentes séquences sèches et de préciser leur durée et leur intensité cumulées.

L'obtention de l'ISSP se fait en trois étapes (PITA, 2001) :

1- calcul des anomalies pluviométriques mensuelles de la série à partir de l'expression :

$$AP_i = P_i - PMED$$

Avec :

AP_i = anomalie pluviométrique de chaque mois i .

P_i = valeur de la précipitation du mois i .

$PMED$ = précipitation médiane de la série correspondant à ce mois de l'année.

2- accumulation des anomalies pluviométriques mensuelles dès le premier mois de la série où l'anomalie est négative (c'est le début d'une séquence sèche) jusqu'au moment où l'anomalie cumulée devient positive c'est-à-dire le début d'une nouvelle séquence à caractère humide. Cette séquence humide se prolongerait jusqu'au moment où une nouvelle anomalie pluviométrique négative aurait lieu. Le calcul dans cette étape se base sur l'équation suivante :

$$APA_i = \sum AP_i$$

Avec :

APA_i = Anomalie pluviométrique cumulée du mois i .

3- obtention de l'indice à partir de la standardisation des anomalies cumulées se réalise en appliquant l'équation suivante :

$$ISSP_i = ZAPA_i = (APA_i - APA) / \sigma_{APA}$$

Avec :

$ISSP_i$ = indice standardisé de sécheresse pluviométrique du mois i .

$\sum APA_i$ = Anomalie pluviométrique cumulée standardisée du mois i .

APA = Moyenne des anomalies pluviométriques cumulées de tous les mois de la série.

σ_{APA} = Écart type des anomalies pluviométriques cumulées de tous les mois de la série.

Pour le calcul de l'indice standardisé de sécheresse pluviométrique, nous nous basons sur les données statistiques des stations de montagne (Tafouralet et Ain Almou).

3.2. Classification de l'ISSP

Pour mieux comprendre l'impact des séquences sèches dépassant l'année sur le milieu naturel et notamment sur le fonctionnement et le comportement des ressources en eaux karstiques, nous avons classé ces séquences en fonction de leur durée de leur intensité mensuelle de l'ISSP (tableau 2.1)

Pour classer l'ISSP nous nous sommes référés au système de classification tel qu'il est présenté dans le tableau 2.11 (LOPEZ *et al.*, 2006; PITA, 2001). La classification de l'ISSP est composée de 8 classes différentes.

La classification considère l'existence d'une séquence extrêmement sèche dès que les valeurs de l'indice sont inférieures à -2, les séquences sont extrêmement humides quand l'indice est supérieur à 2. Entre ces deux séquences extrêmes, il y a les classes suivantes : légèrement sec {0-(-1)}, sec {(-1)-(-1.5)} sévère {(-1.5)-(-2)} et légèrement humide {0-1}, humide {1-1.5}, très humide {1.5- 2}.

Cette classification facilite l'illustration et la distinction de la durée de chaque séquence (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Classification de l'indice standardisé de sécheresse pluviométrique.

Intensité	Valeur ISSP
Extrêmement humide	> 2
Très humide	1.5 à 2
Humide	1 à 1.5
Légèrement humide	1 à 0
Légèrement sec	0 à -1
Sec	-1 à -1.5
Sévère	-1.5 à -2
Extrêmement sévère	< -2

Source : (LOPEZ *et al.*, 2006; PITA, 2001)

Résultat

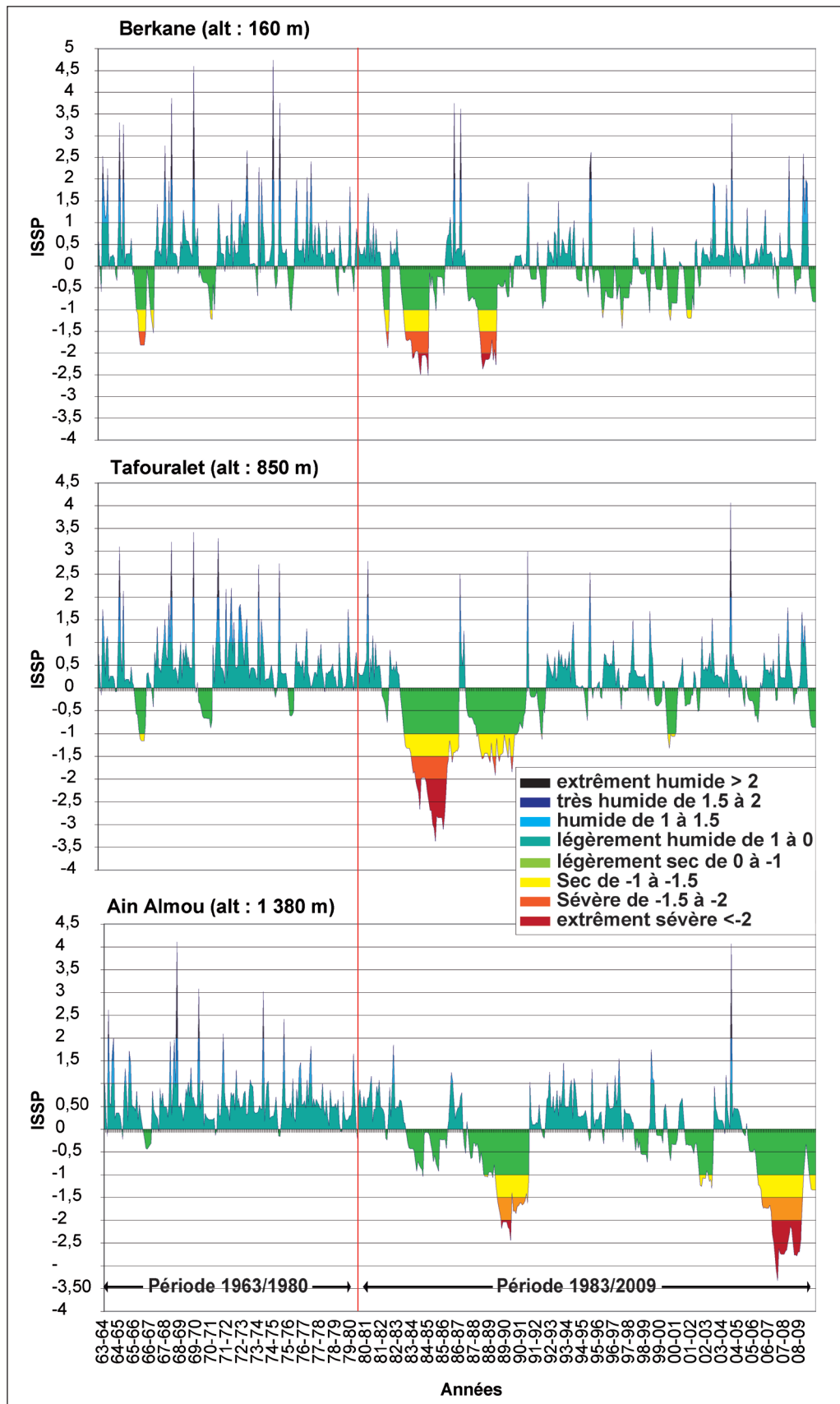
Le calcul de l'ISSP des précipitations tombées dans les stations de *Berkane Tafouralet* et *Ain Almou* pendant la période d'observation 1963/2009 montre l'existence de nombreuses séquences sèches. Ces séquences sont séparées par des brefs pics humides (figure 2.7). Cette figure montre également, qu'à partir des années 80 les séquences sèches sont plus fréquentes et plus longues.

Il est intéressant de souligner l'existence de trois séquences sèches dont la durée dépasse une année pour les stations de *Berkane* et *Tafouralet* et quatre pour la station de *Ain Almou* (tableau 2.2).

Pour la station de *Berkane* la durée maximale de séquence sèche a été enregistrée pendant la période janvier 1983/ octobre 1984, soit 22 mois. L'intensité maximale a atteint l'indice extrêmement sévère pendant le mois d'octobre 1983 (-2). Les autres mois sont caractérisés par des indices (i) sévères (3 mois : août, septembre novembre 1983), (ii) secs (4 mois : juin, décembre 1983 et août septembre 1984), (iii) légèrement secs (14 mois).

La durée des deux autres séquences sèches varie (i) de 17 mois, avec 11 mois légèrement secs et 6 mois sec et une intensité maximale de -1,5 (mai 1965/septembre 1966) et (ii) 23 mois, avec 9 mois légèrement secs, 11 mois secs et 3 mois sévères et une intensité de -1,9 (avril 1987/février 1988).

Pour la station de *Tafouralet* la durée maximale de séquence sèche est de 44 mois enregistrés durant la période juillet 1982/février 1986, avec une intensité extrêmement sévère de -2,8



Source : Météo Maroc

Figure 2.7 : Indice standardisé de sécheresse pluviométrique dans les stations de Berkane, Tafouralet et Ain Almou (1963/2009).

	Séquences Sèches	Intensité maximale	Durée (mois)				Total (mois)
			Légèrement sec	Sec	Sévère	Extrêmement sévère	
Berkane	Mai 1965/Sep 1966	-1,5	11	6	0	0	17
	Janv 1983/Oct 1984	-2	14	4	3	1	22
	Avr 1987/Fevr 1988	-1,9	9	11	3	0	23
Tafouralet	Juin 1965/Sept 1966	-0,9	16	0	0	0	16
	Juil 1982/Fevr 1986	-2,8	13	3	6	22	44
	Avr 1987/Fevr 1988	-1,4	17	6	0	0	23
Ain Almou	Juin 1984/Déc 1985	-1,3	14	5	0	0	19
	Juin 1987/Fevr 1991	-2,4	19	16	6	5	46
	Avr 1997/Nov 1998	-0,9	15	0	0	0	15
	Nov 2004/Oct 2005	-4,4	8	1	1	14	24

Source : Météo Maroc

Tableau 2.2 : Séquences sèches dépassant l'année dans les stations de Berkane, Tafouralet et Ain Almou.

enregistrée en décembre 1984.

L'intensité extrêmement sévère a duré 22 mois allant de septembre 1983 à avril 1984, août 1984 à avril 1985 et de juin 1985 à octobre 1985. Ces périodes constituent les périodes les plus sèches et les plus prolongées pour les trois stations. Les 22 mois restant de la séquence sèche sont répartis sur des périodes (i) sévères (6 mois : juillet, août 1983, juin, juillet 1984 et mai et novembre 1985), (ii) secs (3 mois : mai, juin 1983 et mai 1984), (iii) légèrement secs (13 mois : le reste de la séquence).

Pendant la période juin 1965/septembre 1966 la séquence sèche couvre 16 mois légèrement secs avec une intensité maximale de -0,9.

La troisième séquence relevée s'étale sur 23 mois, avec 17 mois légèrement secs, 6 mois secs, dont l'intensité maximale est de -1,4.

Tandis que pour la station d'Ain Almou, la séquence sèche la plus longue a duré 46 mois (de juin 1987 à février 1991) avec une intensité extrêmement sévère de -2,4 enregistré en octobre 1989. La période extrêmement sévère correspond à 5 mois (de août à décembre 1989). Le reste de la séquence sèche couvre (i) 6 mois sévères (octobre 1988, mai/juillet 1989 et septembre/octobre 1990), (ii) 16 mois secs (août/septembre 1988, décembre 1988/avril 1989, janvier/avril 1990, juin/août 1990 novembre 1990 et janvier 1991).

Pour la station d'Ain Almou, l'intensité maximale a été enregistrée en mars 2003 (-4,4) pendant la séquence sèche de novembre 2004/octobre 2005, soit 24 mois, cette intensité correspond à l'intensité maximale la plus importante de la période d'observation pour les trois stations.

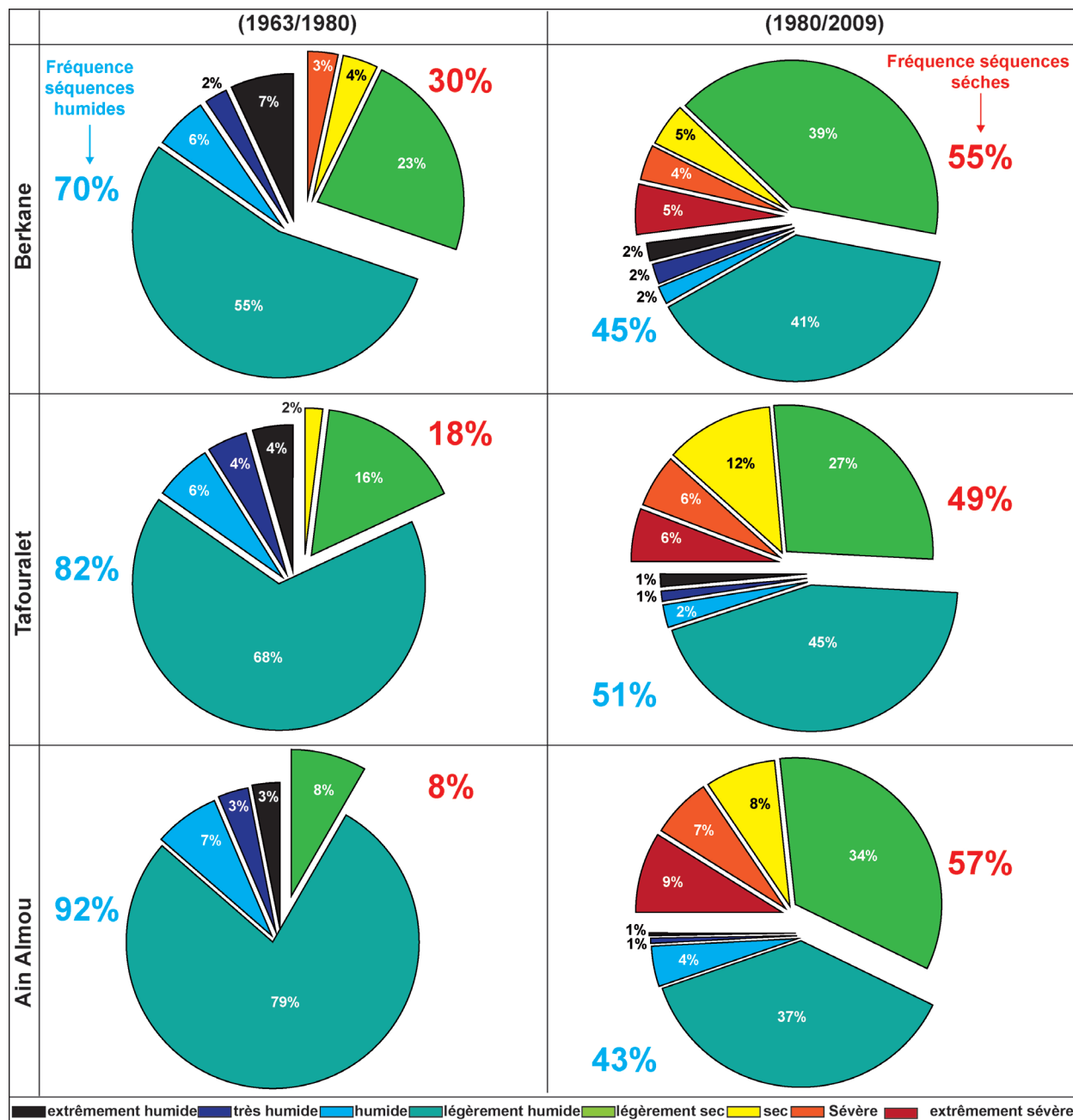
La troisième séquence sèche a une durée de 19 mois (juin 1984/décembre 1985). Elle a enregistré une intensité sèche maximale de -1,3. Il est à noter que cette séquence est caractérisée par 14 mois légèrement secs.

La dernière séquence sèche a duré 15 mois légèrement secs (avril 1997/novembre 1998) avec une intensité maximale de -0,9.

L'étude de l'ISSP met l'accent sur la sécheresse persistante depuis les années 80. Cette sécheresse a forcément une influence directe et indirecte sur les ressources naturelles du milieu : sol, végétation, aquifères...

Comparaison de l'ISSP de deux périodes contrastées

Pour mieux appréhender la baisse des précipitations constatée depuis les années 80 (cf. figure. 2.7) nous avons mené une étude comparative de deux périodes contrastées 1963/1980 et 1980/2009 (figure 2.8).



Source : Météo Maroc

Figure 2.8 : Comparaison de la fréquence de l'ISSP de Berkane, Tafouralet et Ain Almou (1963/1980 et 1980/1999).

Durant la période 1963/1980, les stations de *Berkane*, *Tafouralet* et *Ain. Almou* ont enregistré une fréquence de 70%, 82% et 92% de séquences humides respectivement.

L'ISSP extrêmement sévère est absent pour les trois stations, l'indice sévère est absent pour les stations de *Tafouralet* et *Ain Almou* (il représente 3% pour la station de *Berkane*) et enfin l'indice sec est absent pour la station d'*Ain Almou* (il représente 4% pour la station de *Berkane* et 2% pour

la station de *Tafouralet*).

La fréquence des séquences sèches devient plus élevée durant la période (1980/2009) avec : 55% pour la station de *Berkane*, 49% pour *Tafouralet* et 57% pour *Ain Almou*.

Les années extrêmement sévères et sévères représentent 9% pour la station de *Berkane*, 12% pour la station de *Tafouralet* et 16% pour la station d'*Ain Almou*.

Ceci confirme la baisse de fréquence des précipitations durant la période 1980/2009.

Conclusion

L'analyse des données disponibles permet de classer la zone d'étude dans un climat méditerranéen semi-aride caractérisé par une forte irrégularité spatio-temporelle des précipitations.

L'alternance des périodes humides et des périodes sèches se manifeste à différentes échelles : annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières.

Ce comportement a une double influence (figure 2.9) :

- **une influence directe** sur le fonctionnement des ressources en eaux (comportement hydrographique et drainage souterrain) qui s'exprime par (i) la sécheresse chronique de certaines sources (photo 2.1), liée à la succession des années sèches et (ii) la turbidité des eaux souterraines, après les premières pluies automnales qui tombent sous forme d'averses violentes ;

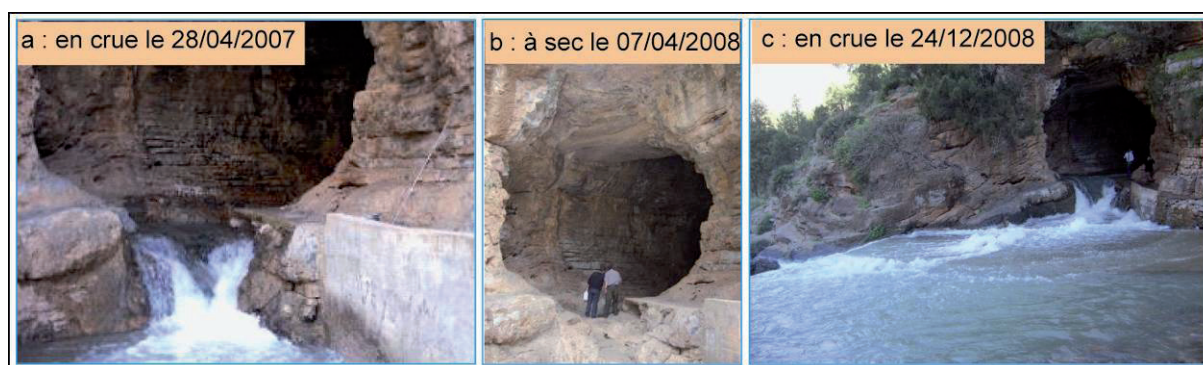


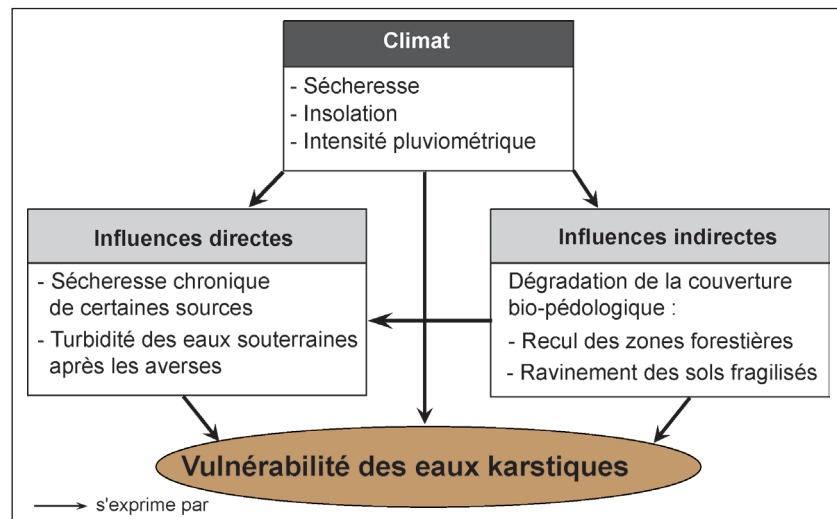
Photo 2.1 : Quelques illustrations de l'assèchement chronique de la source de la grotte du Chameau.

- **une influence indirecte** liée à la dégradation de la couverture bio-pédologique, qui constitue un écran protecteur entre les actions externes et le karst sous jacent, cette dégradation se traduit par le recul des zones forestières, le ravinement des sols fragilisés et l'érosion (TAYEBI et al 2009).

Selon Rognon (1996) le climat peut être une cause directe de la dégradation des milieux « la sécheresse persistante est un risque limité dans le temps mais qui agit directement sur l'ensemble du milieu puisque son impact se transmet de la pluie (sécheresse climatique) au sol (sécheresse édaphique) aux produits de la terre (sécheresse agricole) et aux nappes aquifères (sécheresse hydrologique) ».

Comme l'étude le montre, les pluies sont réparties sur un petit nombre de jours même pour les années les plus humides. Ceci exprime le caractère brutal et orageux des précipitations et justifie l'ampleur de l'intensité pluviométrique. Les pluies violentes s'accompagnent généralement par des impacts sur l'érosion du sol, les mouvements de masse et la turbidité des écoulements.

En contre partie de cette répartition temporelle des précipitations, les périodes pluvieuses sont



Source : (TAYEBI *et al.*, 2009)

Figure 2.9 : Approche systémique de l'influence du climat sur la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques.

séparées par des périodes assez longues de sécheresse très ensoleillées. Celles-ci se manifestent par une déshydratation de la végétation et un dessèchement du sol accompagné par une apparition de dessiccation.

Les influences des précipitations contrôlent donc (i) l'alimentation de la recharge des aquifères karstiques et (ii) la fragilisent et/ou le renforcement la couverture protectrice du système « vulnérabilité des ressources en eau karstiques »

Dans la deuxième partie de ce travail de thèse, nous allons évaluer les caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude (quantité et intensité de pluie) pour mettre en avant leurs impacts sur la répartition spatiale et temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques en milieu méditerranéen.

2.2. PARAMÈTRE « COUVERTURE PÉDOLOGIQUE »

Dans la méthode de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique, la couverture pédologique est un des facteurs naturels de protection. Son importance réside dans l'atténuation de la vulnérabilité en fonction des paramètres suivants : épaisseur, texture/structure, teneur en matière organique et en minéraux argileux, capacité d'échange cationique, teneur en eau et conductivité hydraulique, etc.

Le croisement des critères « perméabilité » et « épaisseur » du sol, à l'aide d'un SIG, permet d'évaluer la vulnérabilité des sources karstiques. Le degré de vulnérabilité varie en fonction du rôle joué par ces deux critères dans le contrôle de l'infiltration des eaux de pluie et leurs capacité de traverser la couverture pédologique afin d'alimenter les aquifères karstiques.

Pour répondre à cette problématique l'étude sera basée, dans un premier temps, sur les travaux déjà existants, qui permettent de définir les types de sols, leurs répartitions et leurs caractéristiques pédologiques : textures, structures, etc. Ces données sont éparses lacunaire et pas assez nombreuses. Dans un deuxième temps, l'objectif est d'estimer la conductivité hydraulique et les propriétés de rétention en eau des sols à l'aide des fonctions de pédotransfert (FPT) pour chaque grand type de sols. Le croisement des cartes typologiques et des propriétés hydrauliques permet de générer des cartes de conductivité hydraulique et de rétention en eau (figure 2.10). Ces cartes vont constituer,

par la suite, un outil primordial dans la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, dans la mesure où la couverture pédologique est un des facteurs naturels de protection en milieu karstique.

Pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques, nous traitons également les sols reposant sur des terrains non calcaires. Ce choix est appliqué pour montrer l'influence de ces derniers sur l'infiltration. Ces terrains permettent l'écoulement des eaux de pluies plutôt que l'infiltration. Les eaux ruisselées se perdent en contact avec les roches calcaires qui présentent des points de faiblesses favorisant l'infiltration. Ce caractère sera traité dans la partie d'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques.

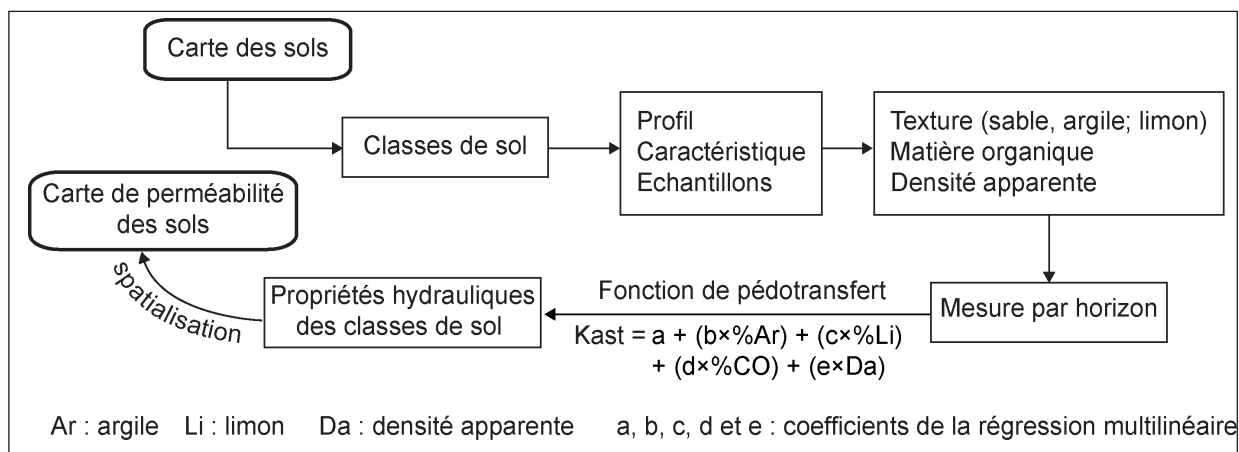


Figure 2.10 : Principales étapes pour l'évaluation de la perméabilité des sols.

1. Les données existantes

La figure 2.11 montre que les sols du massif des Béni Snassen appartiennent à trois catégories (i) sols minéraux bruts : ce sont les sols d'origine non climatiques, ils sont présents dans les zones de forte pente. A l'intérieur de ce groupe on distingue deux sous groupes : les lithosols qui se développent sur les calcaires et les régosols qui se développent sur les schistes et basaltes altérés. (ii) sols calcimagnésiques : ce sont des sols qui caractérisent les affleurements calcaires. A l'intérieur de ce groupe on distingue deux sous groupes : les rendzines et les sols bruns. (iii) sols fersiallitiques (il s'agit de sols à caractère climatiques de la zone méditerranéenne) : à l'intérieur de ce groupe on distingue, également, deux sous groupes : les sols rouges fersiallitiques et les sols bruns rouges fersiallitiques. Ces sols reposent sur différents substrats (calcaires, basaltes, et schistes).

Dans un premier temps, cette étude est basée sur bibliographie, notamment les travaux de (BOUMEAZA, 1985; RUELLAN, 1971). Ces travaux universitaires ont permis de constituer une base de données regroupant les différents types de sols rencontrés dans la zone d'étude. Il est important de souligner que ces travaux se basent sur une classification ancienne des sols connue sous le terme C. P. C. S (La classification française des sols, la *Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols* était élaborée par étapes successives par G. Aubert et P. Duchaufour en 1967).

La répartition de ces formations pédologiques sera présentée en fonction des roches en place afin de mieux faciliter l'interprétation par la suite (cf. Annexe 8).

Bien que ces sols reposant sur les affleurements schisteux et basaltiques ne fassent pas l'objet de nos recherches, leur étude permet de comprendre le contact avec les sols développés sur le calcaire.

1.1. Les sols rencontrés sur substratum schisteux

Les principales catégories de sols rencontrés dans le massif schisteux sont :

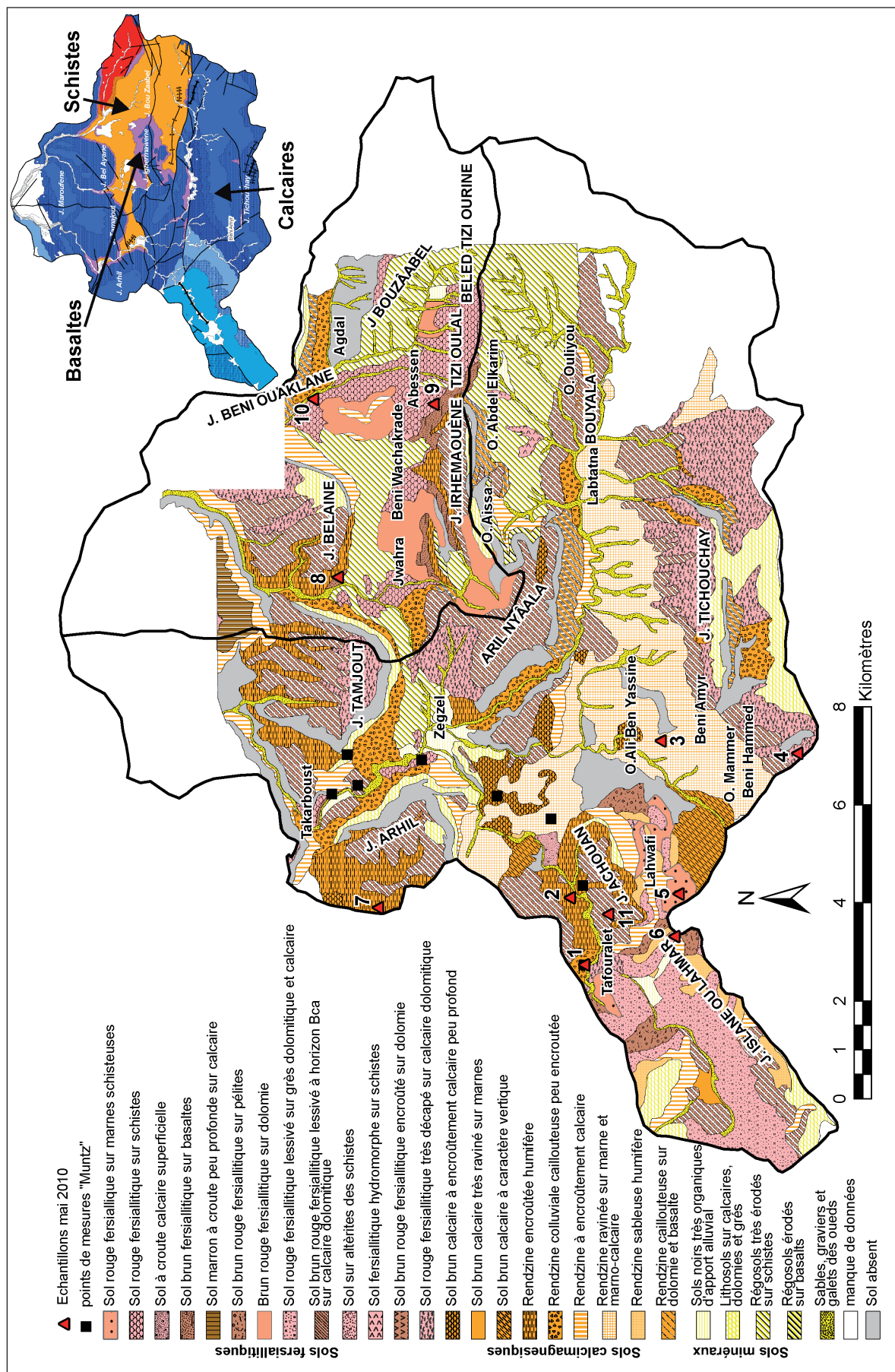


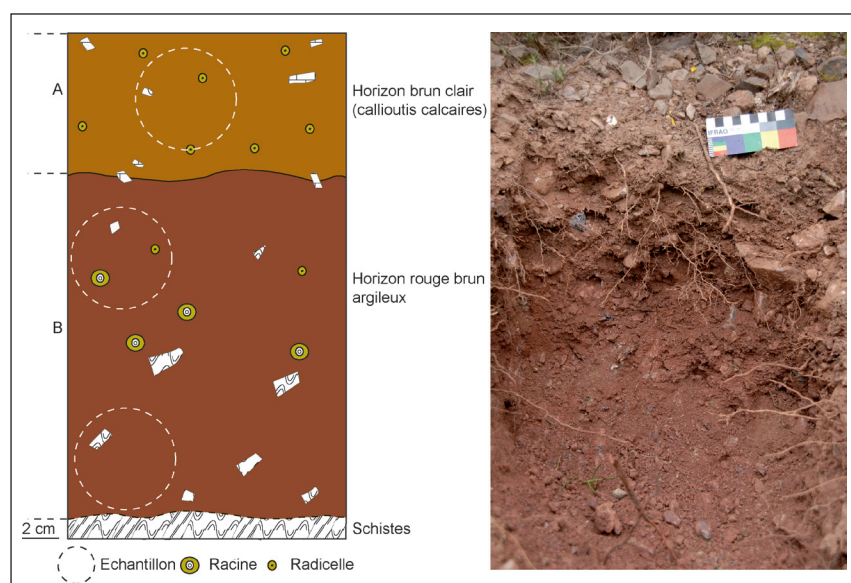
Figure 2.11 : Carte des sols des bassins versant Zegzel et Beni Ouaklane.

Les régosols : le versant le plus caractéristique de ce type de sol est le versant le *jbel Bouzâabel*. Lorsque la pente est supérieure à 50%, la couverture pédologique se résume à des régosols très caillouteux. Sur les pentes les plus modérées (50 à 30%), le versant est couvert par des régosols squelettiques à texture grossière, ce type de sol est également présent dans le versant de *Beni Bou Yala*.

Les sols rouges fersiallitiques : ils tapissent les versants à pente modérée à faible, on les rencontre à *Bled Ourine*, à l'amont d'*Abessen*, au *Bled Ain Tijjent*, à *Beni Ouachakrad*, à *Jouahra* et à *Ouartas*. Leurs profondeurs dépassent rarement les 80 cm (figure 2.12).

Figure 2.12 : Sol rouge fersiallitique sur schistes (sol n° 10).

mai 2010



Sols sur altérites : la surface qu'ils occupent est très limitée, ils se situent au sommet de *Bled Tizi Ourine* ; l'épaisseur de cette couverture est en moyenne de 90 cm, localement elle dépasse les 1m 20 (figure 2.13).

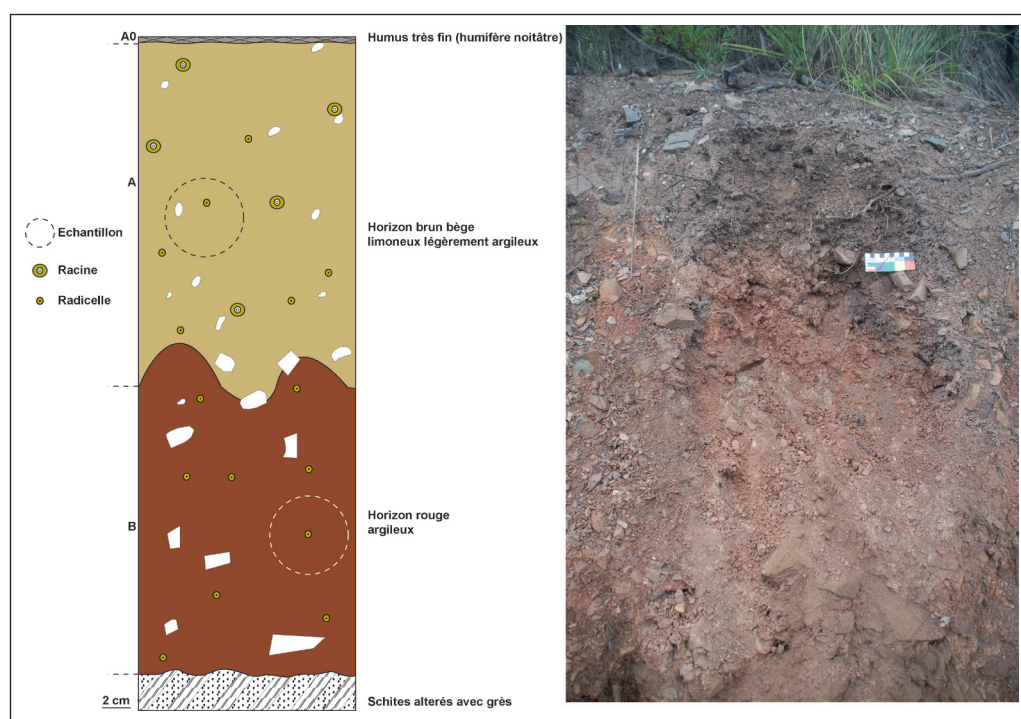


Figure 2.13 : Sol rouge fersiallitique sur schistes altérés (sol n° 9).

mai 2010

Les sols fersiallitiques à caractères hydromorphes : ils sont très localisés et essentiellement sur des replats, généralement au fond de vallons où existe un suintement des eaux pendant une période assez prolongée de l'année. L'engorgement par l'eau de la partie superficielle décompactée des schistes est dû à la faible porosité en profondeur qui ne permettent pas une infiltration suffisamment importante des pluies tombant en averses.

1.2. Les sols reposant sur substratum basaltique

Les sols qu'engendrent les basaltes sont soit des régosols, des rendzines brunifiées ou des sols bruns fersiallitiques. Chaque type de sol est caractéristique d'un type de modelé particulier.

Les régosols des versants à forte pente (30 à 25%) : ils se développent sur les affleurements des basaltes à l'est d'*Aril Nyâala* et sur le front sud de *jbel Irhemaouène*. La couche altérée est vite soumise à une érosion sélective. Ceci est dû à leur nature texturale limoneuse à sablo-limoneuse et peu argileuse, qui facilite les agressions mécaniques liées aux précipitations brutales. De même leur structure granulaire favorise leur désagrégation. Leur épaisseur ne dépasse pas les 20 cm.

Les rendzines brunifiées à encroûtement calcaire sur versant à pente moyenne (30 à 10%) : elles se déploient autour de *jbel Irhermaouène* en suivant l'affleurement des basaltes et sur la topographie favorable à ces types de rendzines, généralement, elles montrent un encroûtement feuilleté (figure 2.14).

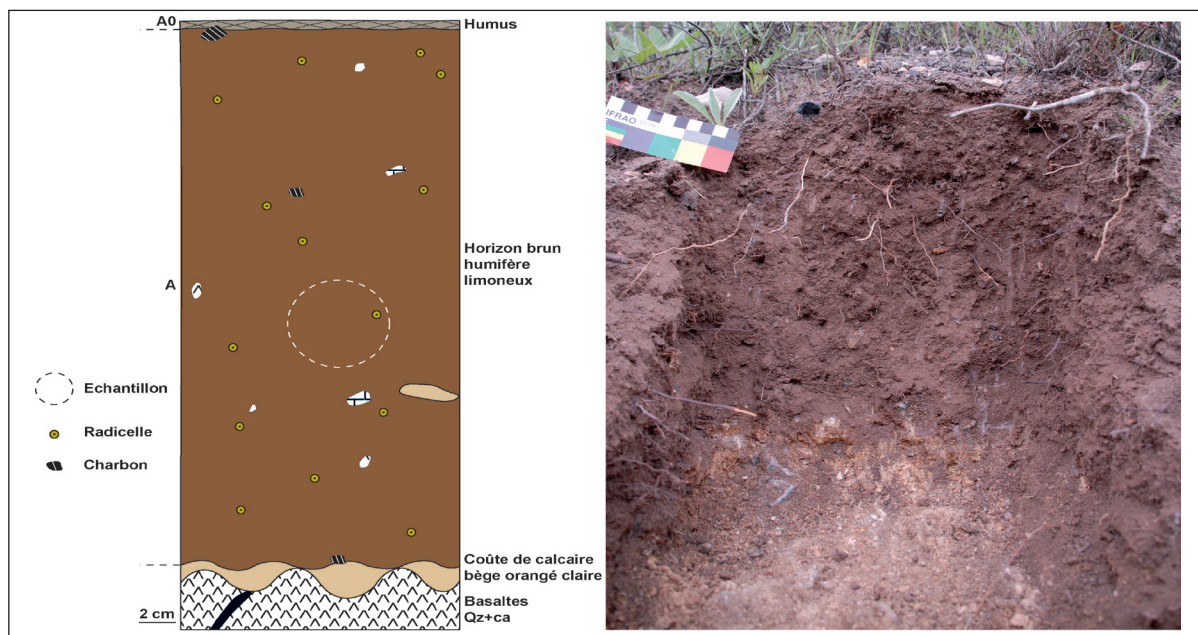


Figure 2.14 : Sol brun humifère sur basaltes (sol n° 8).

mai 2010

Les sols bruns fersiallitiques à pente modérée : ils n'occupent que les topographies dont la pente modérée (5 à 20 %) a permis la conservation des sols. On les trouve à l'amont de douar *Jwahra* et à l'extrémité ouest de *Tizi Oulal*, leur épaisseur peut atteindre 100 cm.

1.3. Les sols reposants sur substratum calcareo-dolomitique

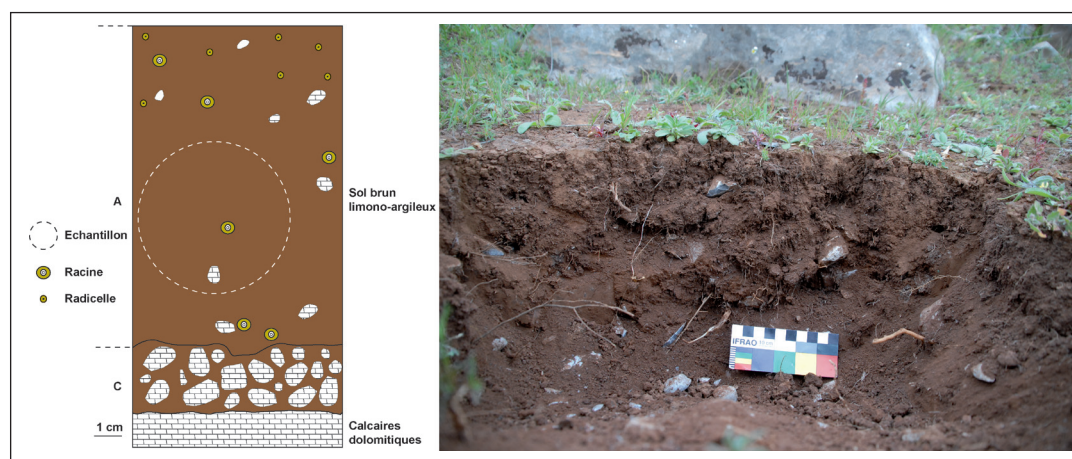
Les sols sont caractérisés par leurs discontinuités liées à la pente, les formes géomorphologiques et la densité de la couverture végétale.

Les bordures calcaréo-dolomitiques du massif ancien

Dans ce groupe on distingue cinq grandes unités pédologiques qui sont :

Les lithosols des hauts sommets à pente forte : on les rencontre soit entre les lapiés, soit en champs de pierres où leur épaisseur varie de 0 à 30 cm. Quand la pente est très forte, la surface est riche en cailloux calcaires, la taille de ceux-ci varie entre 5 cm et 20 cm. Ces lithosols sont particulièrement étendus sur les versants de jbel *Bel Ayyane*, jbel *Tamajout* et jbel *Arhil*.

Les sols fersiallitiques très décapés et tronqués, sur des pentes modérées à fortes : ces sols tapissent les hauts du jbel *Tamajout*, jbel *Bel Ayyane*, jbel *Béni Ouakalane*, et les vallons secs perchés d'*Arhil Nyaâla*. Ces sols couvrent également les surfaces à formes karstiques, leur épaisseur est variable selon la taille et l'évolution de ces formes karstiques (figure 2.15).



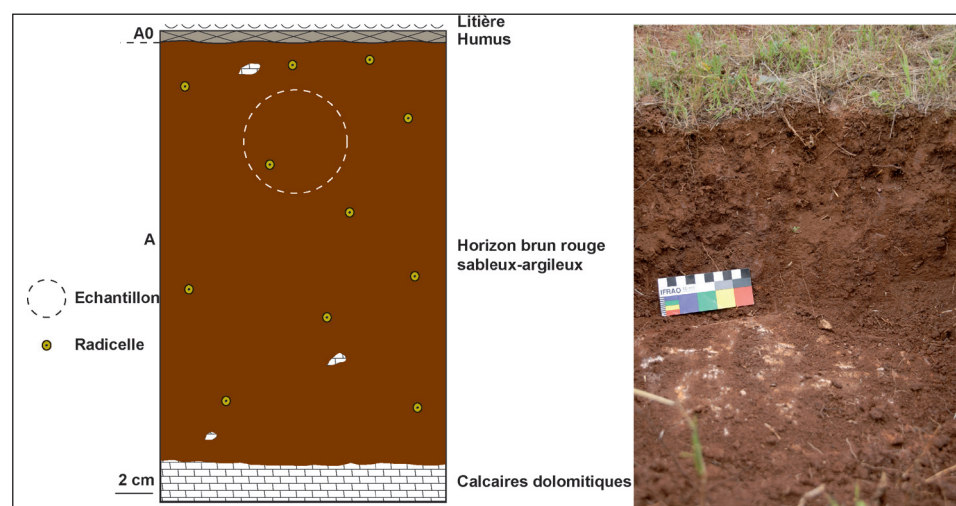
mai 2010

Figure 2.15 : Sol rouge fersiallitique décapé sur calcaires dolomitiques (sol n° 5).

Les sols bruns rouges fersiallitiques lessivés des versants à pente modérée : ces sols sont caractérisés par l'absence totale de calcaire en surface, leur épaisseur varie selon la pente, l'érosion et l'évolution des formes karstiques. Ce type de sol est surtout présent sur les versants du jbel *Béni Ouakalane*, jbel *Irhermaouène*, jbel *Bel Ayyane*, jbel *Tamajout* et à *Arhi Nyaâla*.

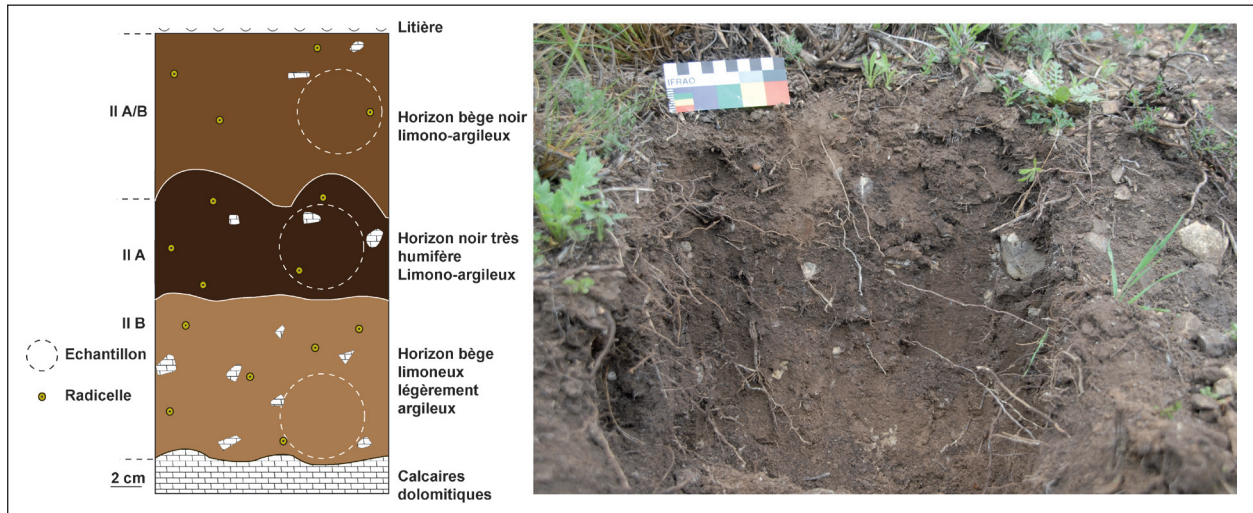
Les sols bruns rouges fersiallitiques encroûtés sur dolomie : ces sols ont été rencontrés à l'ouest de jbel *Irhermaouène*, à l'est de jbel *Arhil Nyaala*, à *Ouartas* et à *Beni Ouaklane*. A *Ouartas* et *Béni Ouakalane*, ces sols conservent une épaisseur assez stable, tandis qu'à jbel *Irhermaouène* et *Aril Nyaala* ils sont soumis à l'érosion. Leur profondeur peut atteindre 100 cm (figure 2.16).

Figure 2.16 : Sol brun rouge fersiallitique sur calcaires dolomitiques (sol n° 11).



mai 2010

Les rendzines calcaires brunifiées des versants abruptes : ces sols sont calcaires dès la surface et très humifères, leur texture est plus est moins grossière mais aussi argileuse et argilo-limoneuse. La structure est grumeleuse à fine ou grenue. Ce type de sol est rencontré sur le versant de jbel *Arhil* exposé au nord, et sur les versanst de jbel *Tamajout* (figure 2.17).



mai 2010

Figure 2.17 : Rendzine brune humifère sur calcaires dolomitiques (sol n° 7).

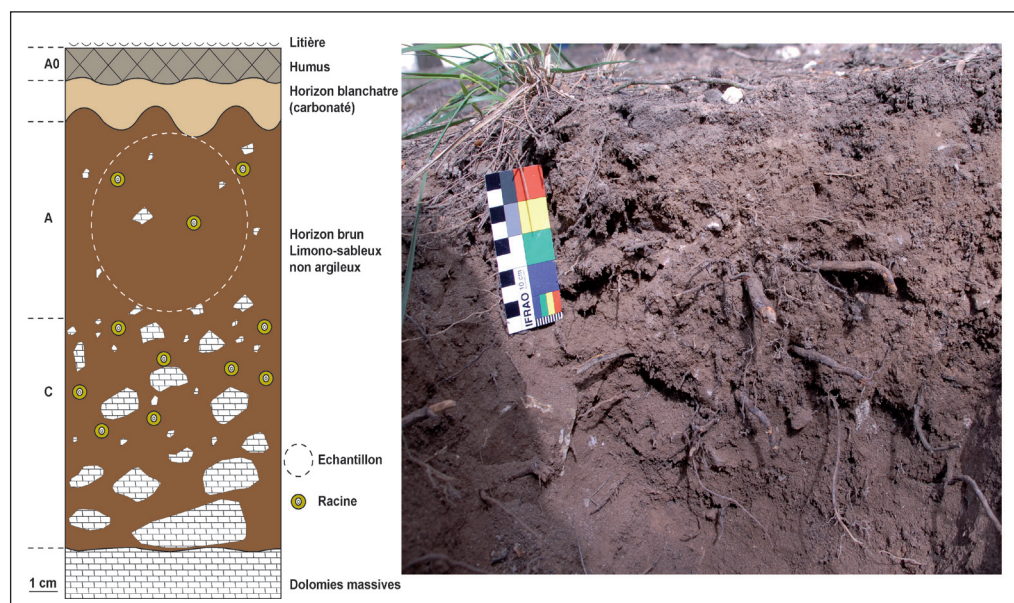
Les versants calcareo-dolomitiques

On distingue les grandes unités pédologiques suivantes :

Rendzines ravinées sur marne et marno-calcaire : elles couvrent les versants à pentes fortes ce qui favorise le décapage et le ravinement. Ces sols sont d'une part très décapés sous l'effet de la mise en culture, et d'autre part de l'absence d'un couvert végétal protecteur face aux fortes précipitations qui tombent sous forme d'averses. Ces rendzines sont caractérisées, par leur faible profondeur qui varie de 0 à 20 cm et leur charge grossière abondante en surface, issue des bancs calcaires. Leur texture est très limoneuse, les taux d'argiles sont très faibles.

Les rendzines colluviales caillouteuses peu encroûtées : à l'aval des dépôts de pentes, le pourcentage de matrice fine devient important ce qui favorise l'évolution des rendzines épaisses et calcaires (figure 2.18).

Figure 2.18 :
Rendzine
colluviale
(sol n° 1).



mai 2010

Les rendzines à encroûtement calcaire : elles sont caractérisées par des teneurs élevées en carbonates, leur profil n'est pas profond et dépasse rarement 50 cm. Leur répartition est liée aux conditions topographiques de pente modérée à forte et aux conditions bioclimatiques (figure 2.19).

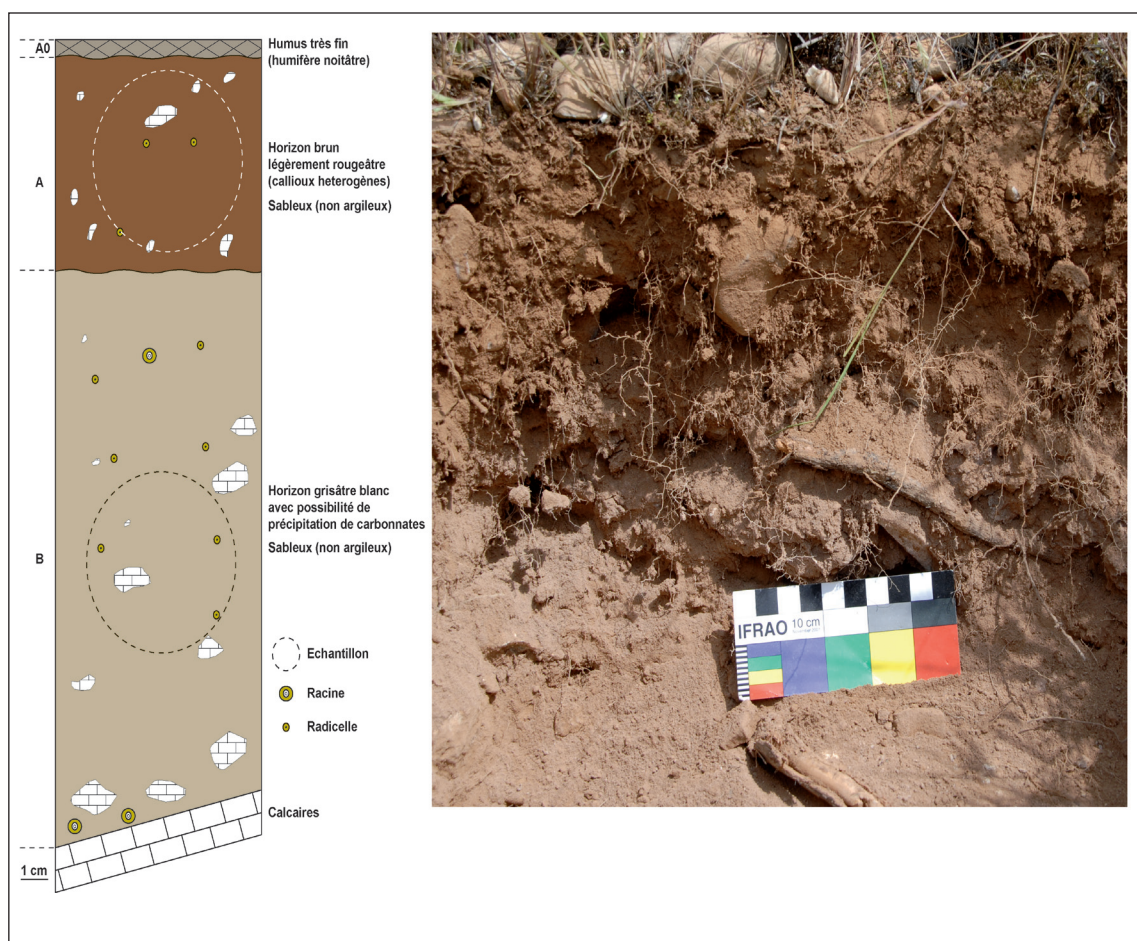
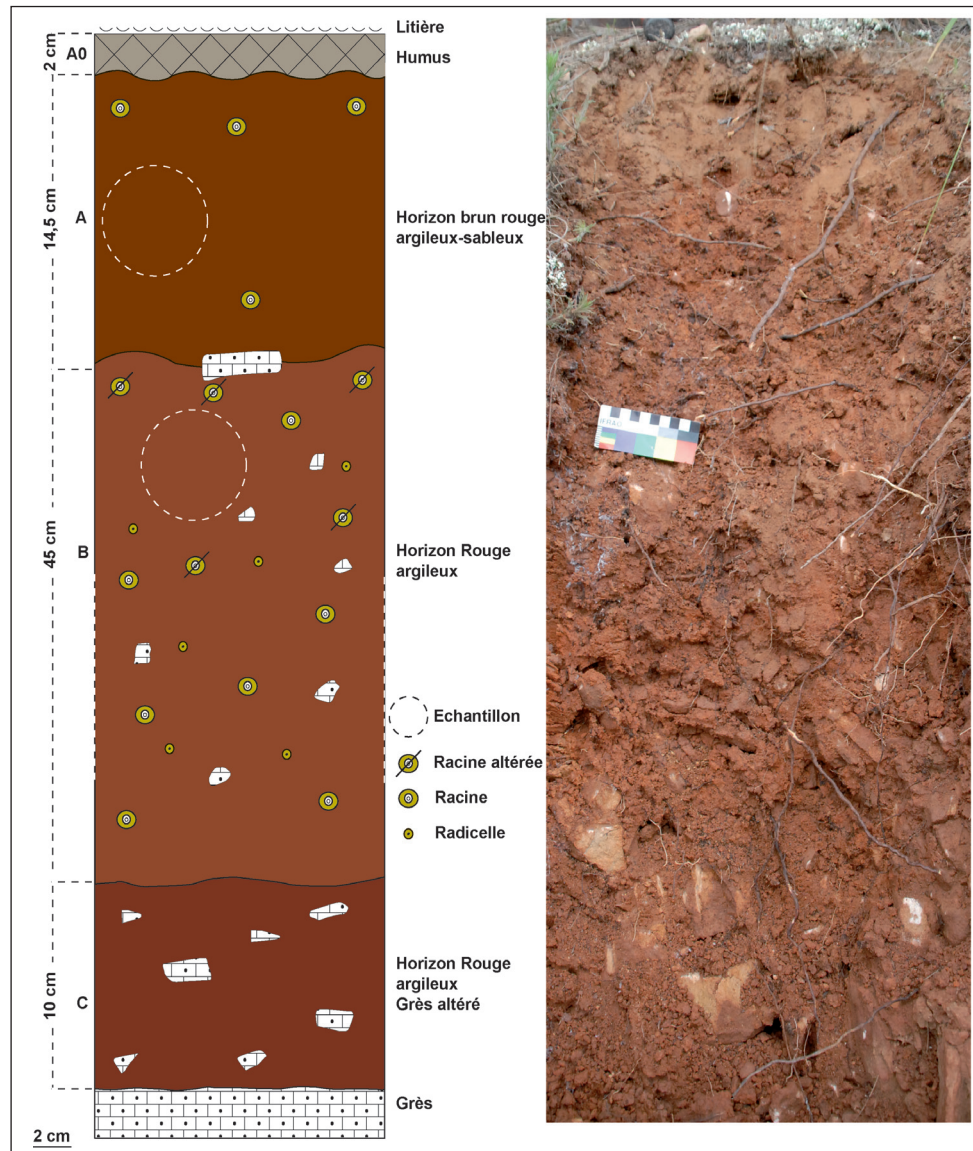


Figure 2.19 : Rendzine encroûtée humifère (sol n° 2).

mai 2010

Les rendzines sableuses humifères : ce type de sol évolue sur place sur les versant de jbel *Islane* ou *Lahmar*, le versant de jbel *Achouan*. Ces rendzines sont caractérisées par leur texture sableuse.

Les sols fersiallitiques lessivés sur grès, dolomitiques et calcaires : ces sols se caractérisent par une texture sablo-argileuse et argilo-sableuse, leur surface est jonchée d'une charge grossière variable selon la pente (figure 2.20).



mai 2010

Figure 2.20 : Sol rouge fersiallitique sur grès dolomitiques (sol n°6).

Les sols rouges fersiallitiques à caractère verticale : ces sols sont très communs sur le substrat marno-flyschoïde¹ à bancs gréseux, dominé par un amont gréseux très altéré. Ils sont parfois couverts de matériaux colluvionnés sableux rouges (figure 2.21).

1. Qualifie un type de dépôt terrigène issu des surfaces continentales à base de grès et de schistes.

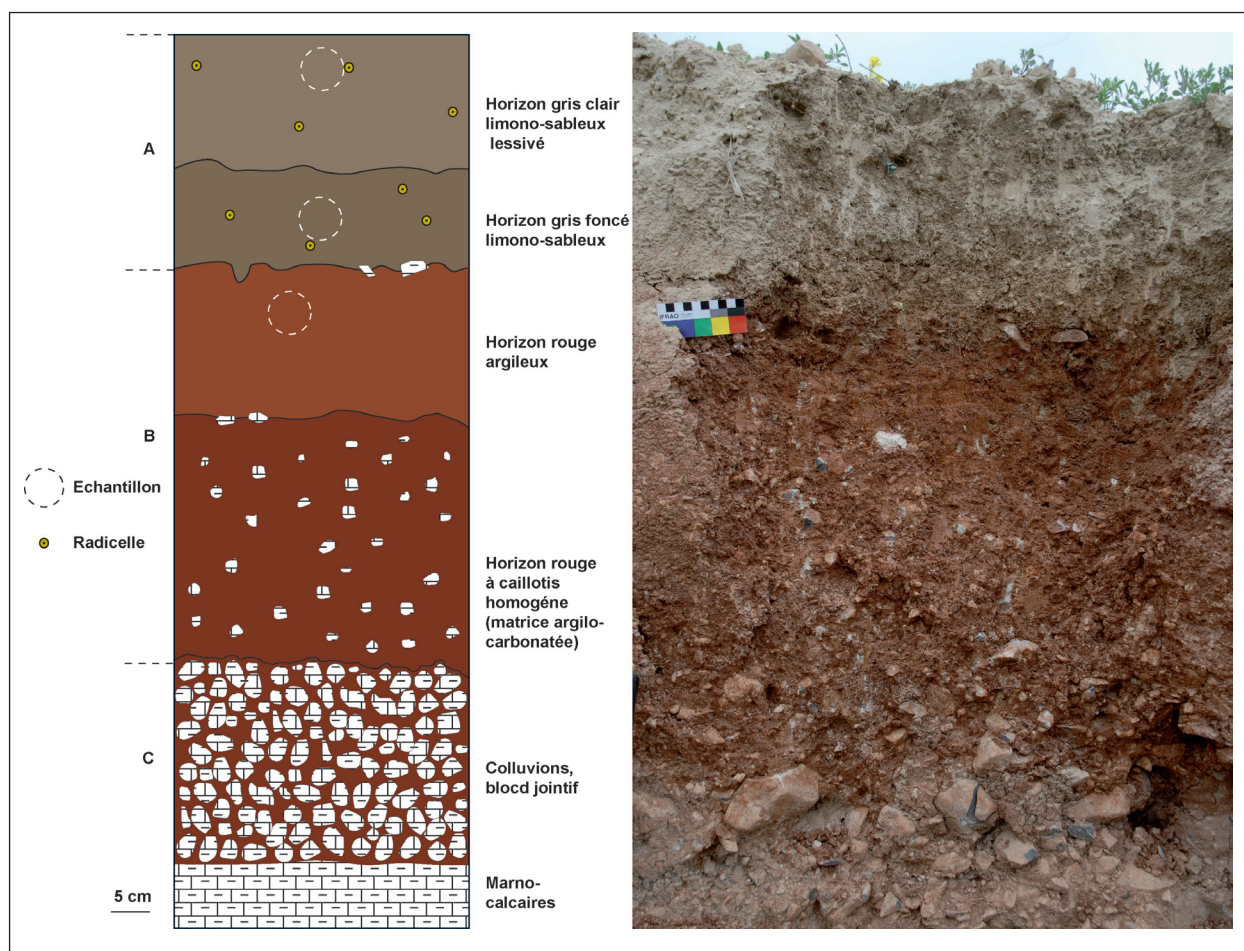


Figure 2.21 : sol rouge fersiallitique lessivé sur marno-calcaires (sol n°4).

mai 2010

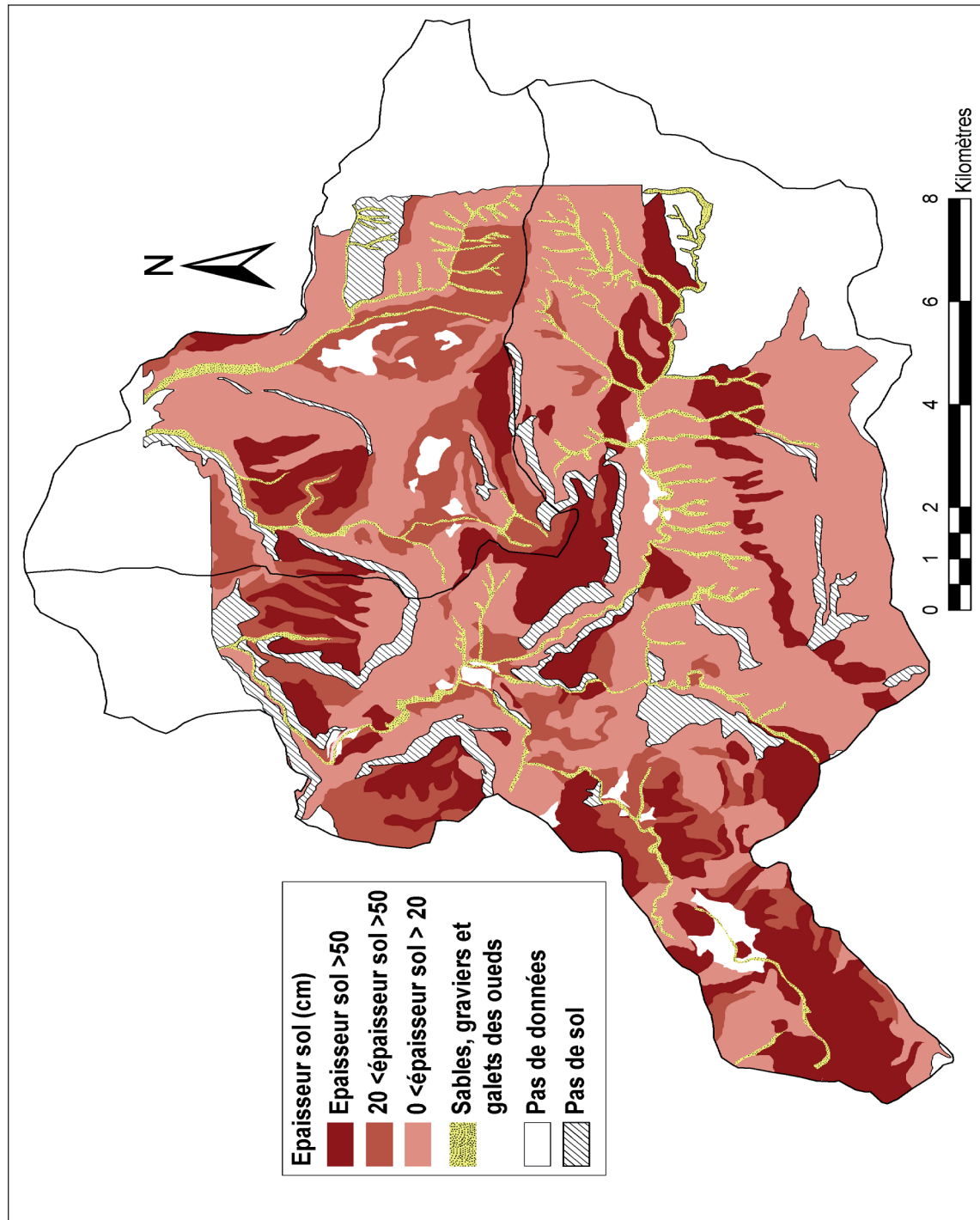
Sol d'apport alluvial : ces sols se déploient à la convergence de l'oued *Tazoumourt*, et l'oued *Bouchta* et les vallons et les talwegs qui dominent la plaine d'érosion de *Tafouralet*. Ces sols sont sablo-limoneux peu argileux, et très profonds.

1.4. Epaisseur de sols

Le paramètre « épaisseur du sol » peut influencer le pouvoir protecteur de la couverture pédologique. Les informations concernant ce paramètre ont été acquises à partir des travaux pédologiques existants (BOUMEAZA, 1985 ; RUELLAN, 1971), ainsi que des mesures directement réalisées sur le terrain à l'aide d'une tarière, pendant les missions printemps 2009 et 2010 (photo 2.2).

La définition de l'épaisseur du sol a donc deux origines différentes : données bibliographiques et données de terrain. La création de la base de données du critère « épaisseur du sol » s'appuie d'abord sur les références bibliographiques citées, ensuite et afin avoir plus de précision, des missions de terrain ont été menées pour compléter la base de données bibliographique (annexe 8). Cette démarche a pour but d'affiner les données, surtout que les données bibliographiques sont très vastes, ce qui ne correspond pas aux caractéristiques des sols en milieu méditerranéen qui sont moins développés et très hétérogènes.

La spatialisation de cette donnée (figure 2.22) a permis d'obtenir une carte d'épaisseur de la couche pédologique dans laquelle on distingue (i) des sols peu évolués qui ne dépassent guère les 20 cm (rendzine, régosol et lithosols) ; (ii) des sols moyennement évolués qui ont une épaisseur



Sources : (RUELLAN, 1971 ; BOUMEAZA, 1985), complété

Figure 2.22 : spatialisation du paramètre épaisseur du sol.

Photo 2.2 : Mesure de l'épaisseur du sol à l'aide d'une tarière (printemps 2009).



variable de 20 à 50 cm (sol brun calcaire à encroûtement, sol rouge fersiallitique sur schistes) et (iii) des sols évolués présentant une épaisseur supérieure à 50 cm (sol rouge fersiallitique sur grès dolomitiques, sols bruns rouges sur calcaires dolomitiques, sols bruns calcaires à caractère vertique, sols fersiallitiques lessivés sur grès dolomitique et calcaire, sols bruns rouges fersiallitiques encroûté sur dolomie, sols fersiallitiques hydromorphes sur schistes etc).

L'épaisseur des sols est contrôlée localement par les formes karstiques (les dolines peuvent avoir localement des sols épais), ce point n'a pas été pris en compte dans cette étude pour les raisons suivantes : (i) la dimension de la maille de la grille des autres paramètres étudiés dans le cadre de cette recherche est de (90x90 m). Ce choix est imposé par la disponibilité d'un MNT à 90 m² ; (ii) l'échelle de la zone d'étude est de 187 km² ; le coût, et le temps d'acquisition de données aussi détaillées. Il est à noter que ces conditions n'ont pas permis prise en compte de la variation de l'épaisseur métrique et décimétrique.

2. Perméabilité des sols

Après avoir identifié les principaux types de sols. L'objectif est de mesurer et spatialiser le coefficient de perméabilité de sols. Cette démarche a été effectuée en plusieurs étapes : (i) manipulation sur le terrain « méthode de double anneau » en 2009, échantillonnage en 2010, (ii) analyses (des échantillons) au laboratoire, (iii) analyse bibliographique et (iv) spatialisation de la perméabilité du sol.

2.1. Terrain

Deux types de méthodes ont été appliqués pour déterminer la perméabilité de sols.

Méthode de « Muntz »

Pour évaluer les variations spatiales de l'infiltration des sols, en printemps 2009, nous avons mené une étude basée sur la méthode de « Muntz » (COLOMBANI *et al.*, 1972). Huit mesures ont été effectuées (figure 2.10). Le principe de cette méthode est de mesurer l'infiltration d'une lame d'eau sous charge constante, s'infiltrant verticalement dans le sol en utilisant un infiltromètre consistant en deux cylindres (photo 2.4).

Photo 2.3 : Le double infiltromètre de Muntz.



Procédure de mesure

Une fois les doubles anneaux enfoncés dans le sol on verse l'eau sur une hauteur d'environ 3 cm dans l'anneau extérieur pour maintenir une charge en eau, visant à empêcher toute infiltration latérale de l'eau à partir du petit cylindre. Le principe de l'opération est de mesurer le temps *d'infiltration d'un volume d'eau fixe* (100 cl), l'opération se répète pendant une durée de mesure déterminée (180 min). Cette opération a été appliquée sur huit sols différents (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Mesures de perméabilités obtenues par la méthode « Muntz ».

Type de sol	Mesures selon la méthode « Muntz »
Rendzine colluviale	320
rendzine encroûtée humifère	215
rendzine ravinée sur marno-calcaires	40
Sol rouge fersiallitique décapé sur calcaires dolomitiques	130
sol brun humifère sur basaltes	161
Sol rouge fersiallitique sur schiste	208

L'application de cette méthode s'est avérée très longue, très compliquée et mal adaptée aux terrains accidentés. Ceci nous a amené à réfléchir à d'autres méthodes qui nous permettraient d'obtenir les mêmes résultats avec moins de problèmes techniques. En outre, il s'avère finalement que nous avons arrêté les mesures trop tôt. Pour conclure, nous déconseillons cette méthode pour les sols du type de ceux que l'en a dans les Béni Snassen.

Estimation des propriétés physiques de sols à l'aide des fonctions de pédotransfert

La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et les teneurs en eau à différents potentiels sont souvent demandés dans les modèles hydrologiques ou érosifs. L'utilisateur de ces outils ne dispose pas toujours de mesures de ces variables dans le bassin versant concerné et s'il en dispose, ces données ne permettent que rarement l'extrapolation sur l'ensemble du bassin versant. C'est pourquoi il est souvent obligatoire d'utiliser des fonctions de pédotransfert pour les estimer.

Les fonctions de pédotransfert (FPT) sont des outils de prédictions qui relient les propriétés hydriques à des propriétés du sol, comme la teneur en argile, la teneur en carbone organique ou encore la densité apparente.

Dans notre étude, nous utilisons les fonctions de pédotransferts afin d'obtenir des valeurs de la conductivité hydrique à saturation et la rétention en eau.

Choix des échantillons

Nous avons tout d'abord ciblé les sols qui seront échantillonnés à partir de la carte « sols dans le massif des Béni Snassen centraux (Maroc oriental) (BOUMEAZA, 1985). Le choix des prélèvements a été fait, à la fois, sur l'étendue du sol et sur la nature du substrat sur lequel il repose. Le nombre des échantillons est de 20 prélèvements sur 11 sols différents (cf. carte des sols).

a. Prélèvements

Le prélèvement d'un échantillon de sol doit tenir compte des différents horizons du sol sur l'ensemble du profil.

b. Description du profil

Nous avons procédé à une description détaillée du profil, horizon par horizon en indiquant notamment : l'épaisseur, la couleur, la texture, la présence de cailloux, l'enracinement, la présence ou non d'une croûte calcaire, etc. cette description sera complétée par des analyses en laboratoire. Ensuite nous avons enfoncé les petits cylindres en acier de volume connu (100 cm³) pour prélever dans chaque horizon.

c. Description de l'environnement

Nous avons précisé l'environnement du prélèvement : la géologie, la végétation, exposition, relief, etc.

2. 2. Analyse bibliographique

Les fonctions de pédotransfert correspondent à des modèles empiriques décrivant de façon continue (FPTC) la relation pouvant exister entre les caractéristiques du sol et ses propriétés de rétention en eau. Il existe également des classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) permettant de faire correspondre des propriétés hydriques à des classes de composition des sols. Elles sont bien adaptées à prédire les propriétés de rétention d'eau à l'échelle d'un pays ou d'un continent (MARVAN *et al.*, 2004 ; AL MAJOU *et al.*, 2007a).

De très nombreuses « FPT » existent (annexe 2.2.2) en fonction :

- des bases de données utilisées pour caler les relations ;
- des types d'équation $K(q)$ ou $h(q)$;
- des types de relations statistiques ;

Trois règles de pédotransfert s'appuyant sur des bases de données différentes ont été retenues (annexe 9) : les fonctions de pédotransferts de **SPAW** (Soil Plant Air and Water) (RAWLS *et al.*, 1985; SAXTON *et al.*, 2006), **Rosetta** (GENUCHTEN, 1980; SCHAAP, 1999, 2005; SCHAAP *et al.*, 2001) et **Hypres** (NEMES *et al.*, 2001, 2003; WOSTEN *et al.*, 1998). Pour la teneur en eau à saturation nous utilisons également les FPT à partir de la base de données **SOLHYDRO 1.0** (AL MAJOU *et al.*, 2007a, 2007b).

Avant la spatialisation de perméabilité du sol, le traitement des échantillons en laboratoire a constitué une étape primordiale dans notre démarche (annexe 10)

2.3. Spatialisation de la perméabilité du sol synthétisé

Les cartes de la conductivité hydraulique et de la teneur en eau à saturation ont été générées à partir des différents « FPT » en se basant sur les données obtenues sur le terrain et la carte pédologique de (BOUMEAZA, 1985). Il est à noter que les sols cartographiés par (BOUMEAZA, 1985) ont été regroupés en tenant compte de leurs caractéristiques (Annexe 11).

Dans cette approche, nous n'avons pas pris en compte l'influence de la croûte superficielle sur les deux paramètres étudiés (la conductivité hydrique à saturation et la rétention en eau).

Texture des sols

Avant de présenter les résultats cartographiques obtenus de « FPT », nous présentons la texture des sols étudiés à partir du diagramme triangulaire (figure 2.23).

La texture des sols traités (annexes 2.2.5) rentre dans la catégorie argileuse à argilo-limoneuse : (i) les sols reposant sur un substrat calcaire ou calcaire dolomitique ont une texture argileuse à argilo-limoneuse ; (ii) les sols qui couvrent les formations marno-calcaires sont limoneux à limoneux-argileux et (iii) les sols qui tapissent les roches schisteuses ont une texture limoneuse à limono-argileuse. La répartition spatiale des horizons des couches pédologiques doit beaucoup aux caractéristiques de la formation lithologique qui les portent. Les propriétés physiques du sol influencent l'infiltration ou au contraire l'écoulement des eaux de pluies (MUSY *et al.*, 1991; DUCHAUFOR, 2001; GIASSEN *et al.*, 2008). La texture du sol et bien d'autres paramètres tels que la teneur en matière organique et en carbone organique, la densité apparente, la porosité etc. conditionnent la distribution spatiale de la perméabilité de sols.

Pour déterminer la conductivité hydraulique de chaque type de sol et chaque horizon des sols traités, nous utiliserons par la suite les fonctions du pédotransfert.

Détermination de la conductivité hydraulique (Ksat)

Les trois fonctions du pédotransfert (Spaw, Rosetta et Hypres) sont utilisées sur les 11 sols échantillonnés (figure 2.24). Ces sols présentent les grands types rencontrés dans la zone d'étude. Dans ce travail de détermination de la conductivité hydraulique, l'étude se base sur la détermination des valeurs « Ksat » des horizons de chaque type de sols (20 horizons) (cf. annexes 12).

La figure 2.24 permet d'apprécier la pertinence des « PFT ». Les valeurs « Ksat » de « Spaw » et de « Rosetta » sont très proches sauf pour les échantillons 6 et 14. Cette différence peut s'expliquer par le fait que « Spaw » prend en compte la teneur en matière organique pour la détermination du « Ksat ». « Hypres » est également sensible à la matière organique mais contrairement à « Spaw » les valeurs « Ksat » sont faibles quand la teneur en matière organique est plus élevée. « Spaw » représente les valeurs « Ksat » les plus élevées ce qui correspond à des taux d'infiltration plus importants.

La conductivité hydraulique est variable d'un sol à un autre et d'un horizon à un autre pour les trois « FPT » utilisés. En se basant sur la courbe bleue présentant les résultats obtenus à partir des fonctions de pédotransfert de « Rosetta » qui prend en compte les caractéristiques texturales de sol, on constate que les horizons présentant une conductivité faible sont ceux qui ont des valeurs élevées en argile et en limon : (i) l'horizon (Bt) du sol rouge fersiallitique lessivé sur marno-calcaire (échantillon n° 7) présente 20 % d'argile et 54,7 % de limon, (ii) l'horizon (B) du sol rouge fersiallitique sur schistes altérés (échantillon n° 16) présente 22,2 % d'argile et 54,4 % limon. En revanche les sols caractérisés par une conductivité hydraulique élevée, ont des teneurs élevées en sable. A titre d'exemple, l'échantillon n° 17 (l'horizon (A) du sol rouge fersiallitique sur schistes) présente le taux d'infiltration le plus important des sols traités avec 47,2 % de sable et seulement 13,2 % d'argile.

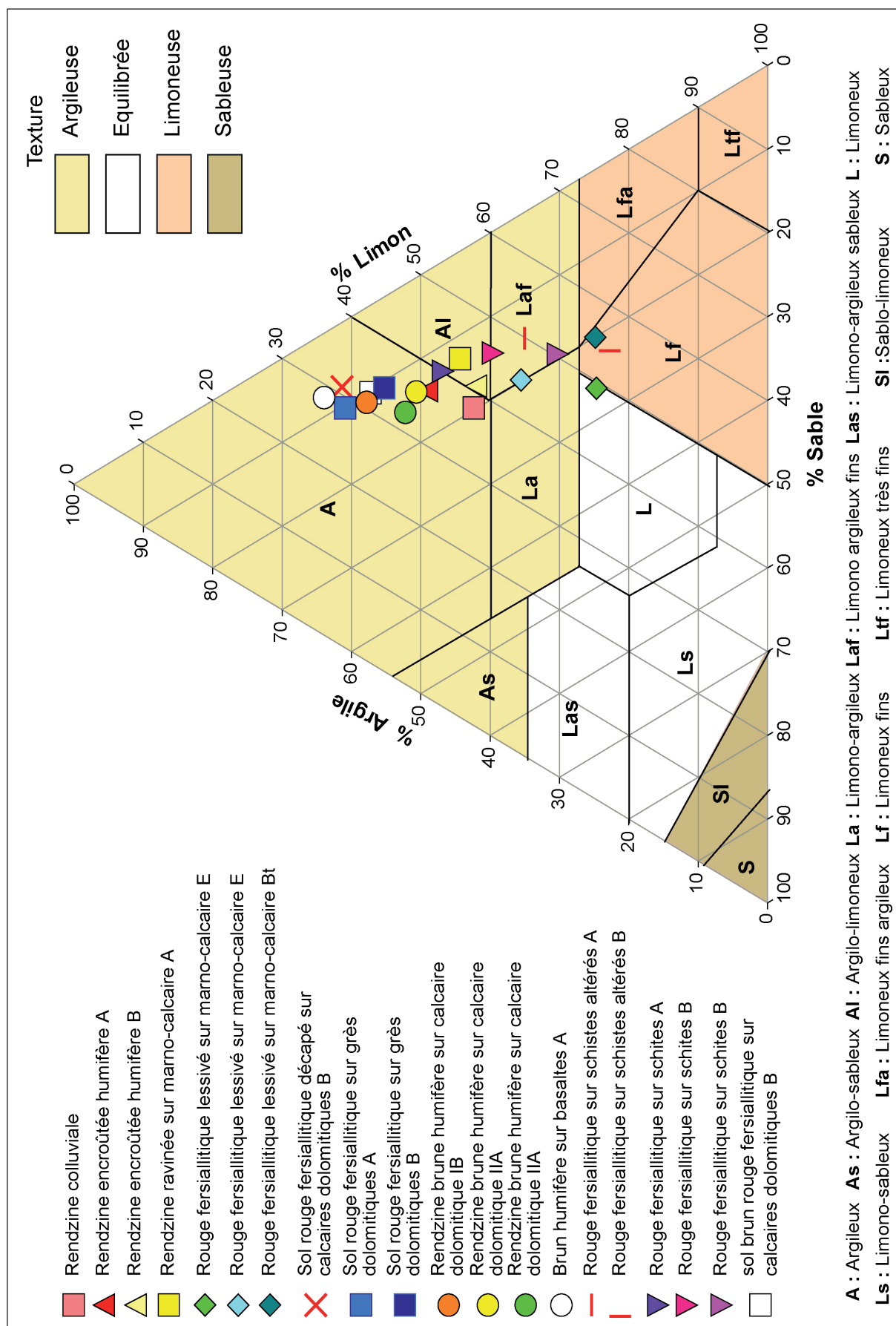


Figure 2.23 : Diagramme triangulaire des horizons de sols prélevés (mai 2010).

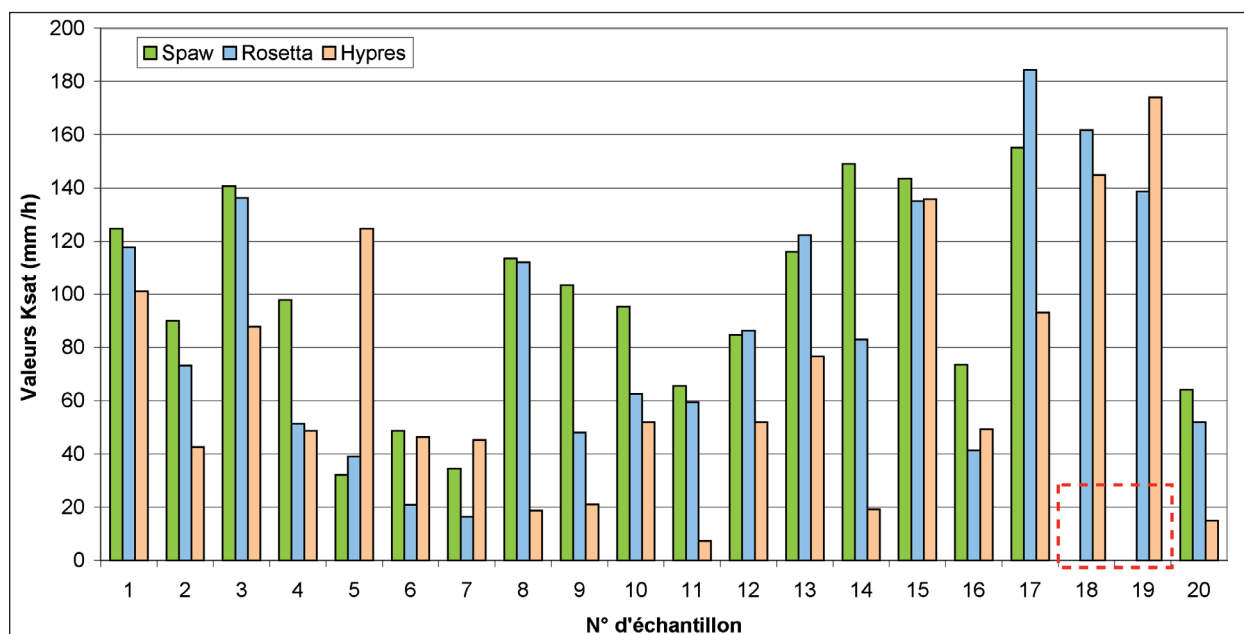


Figure 2.24 : Comparaison du Ksat selon les fonctions du pédotransfert de Spaw, Rosetta et Hypres (pointillés rouge : valeurs non calculées par le logiciel Spaw quand les éléments grossiers sont supérieurs à 1).

Pour spatialiser les valeurs « kast » des trois fonctions du pédotransfert mises à l'épreuve (Spaw, Rosetta et hypres), nous avons tout d'abord assemblé les sols de la zone d'étude en 11 grands types (démarche réalisée en amont de nos missions de terrain). L'assemblage est basé sur les travaux de thèse de (BOUMEAZA, 1985; RUELLAN, 1971). Ensuite, pour plus de lisibilité, nous avons classé les valeurs « Kast » en quatre grandes classes de perméabilité en se basant sur SOIL SURVEY STAFF (1993) (tableau 2.4).

Perméabilité	k (cm/h)
Lent	0,2 à 2
Moyenne	2 à 6,35
Rapide	6,35 à 12,7
Très rapide	>12,7

Source : (SOIL SURVEY STAFF, 1993)

Tableau 2.4 : Catégories de la perméabilité des sols.

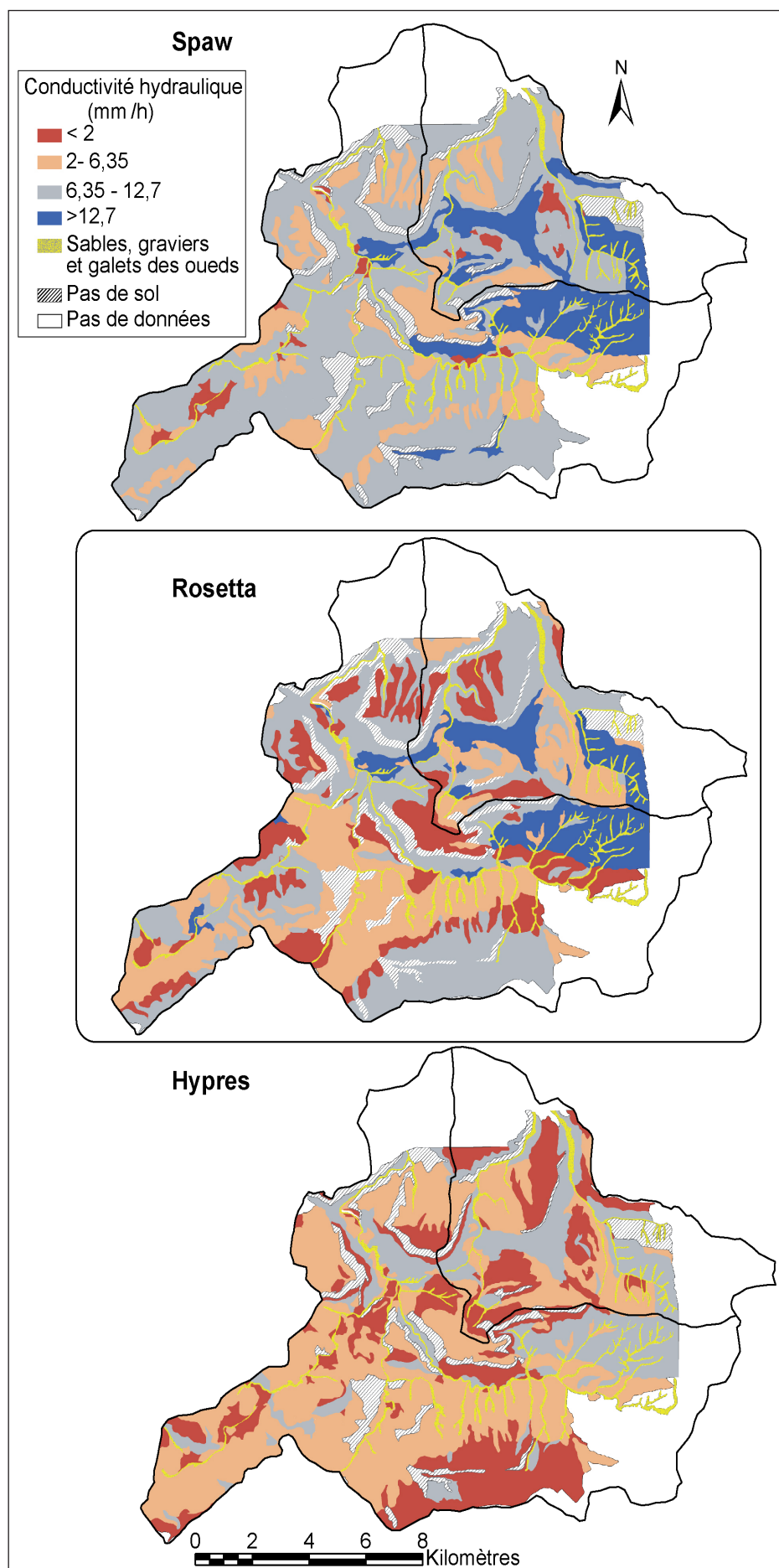


Figure 2.25 : Valeurs Ksat selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Rosetta, Hypres) mai 2010.

Il est important à souligner que la cartographie des « Kast » repose sur la comparaison des horizons qui comprennent les valeurs les plus faibles (figure 2.25). La présence d'un horizon imperméable peut pénaliser l'infiltration verticale.

Dans le présent travail, d'autres paramètres hydro-pédologiques sont traités : réserve utile et la conductivité hydrique des sols non saturés.

Détermination de la réserve utile

Pour ce paramètre nous comparons quatre modules: « Spaw », « Rosetta », « Hypres » et « Solhydro1 » (figure 2.26). Le traitement de ce paramètre prend en compte la somme des valeurs de la rétention en eau des horizons de chaque type de sol. Le graphe présente les 11 sols échantillonnés.

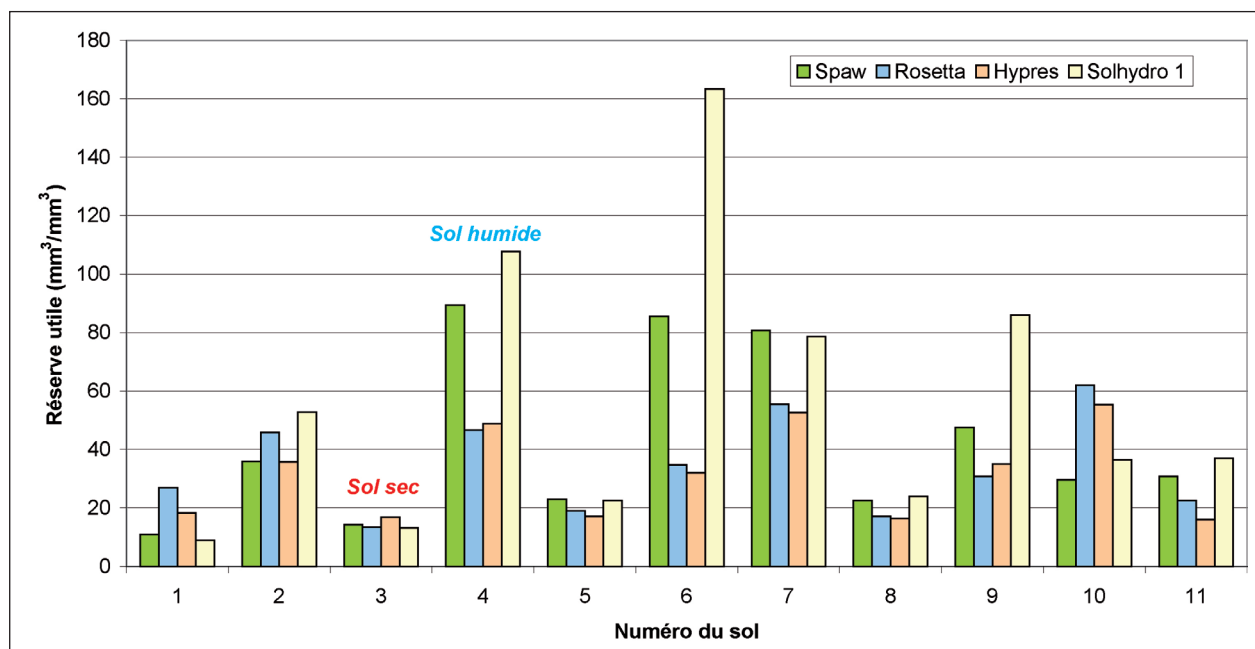


Figure 2.26 : Comparaison de la réserve utile selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Rosetta, Hypres et Solhydro1).

« Hypres » et « Rosetta » ont des résultats très similaires et réagissent aux valeurs texturales. « Solhydro1 » et « Spaw » sont assez proches. « Solhydro1 » présente les valeurs les plus élevées. « Rosetta » donne des valeurs intermédiaires entre les différentes méthodes testées. « Spaw » et « Hypres » sont sensibles à la variation de la teneur en matière organique. « Solhydro1 » représente les valeurs de la teneur en eau les plus élevées et donc les plus exagérées.

D'après la figure 27, les sols présentant une réserve utile élevée sont les rendzines encroûtées humifères (sol n° 2), les sols rouges fersiallitiques lessivés sur marno-calcaire (sol n° 4), les rendzines brunes humifères sur calcaire dolomitique (sol n° 7), et les sols rouges fersiallitiques sur schistes (sol n° 10). Les autres sols présentent une faible rétention en eau.

Pour la cartographie de ce paramètre, nous avons regroupé les valeurs obtenues à partir de différentes fonctions de pédotransfert en 4 classes pour faciliter la lisibilité des résultats cartographiques (figure 2.27). Ce paramètre est important car les estimations obtenues correspondent au volume d'eau présent dans le sol et qui peuvent être utilisé par les plantes.

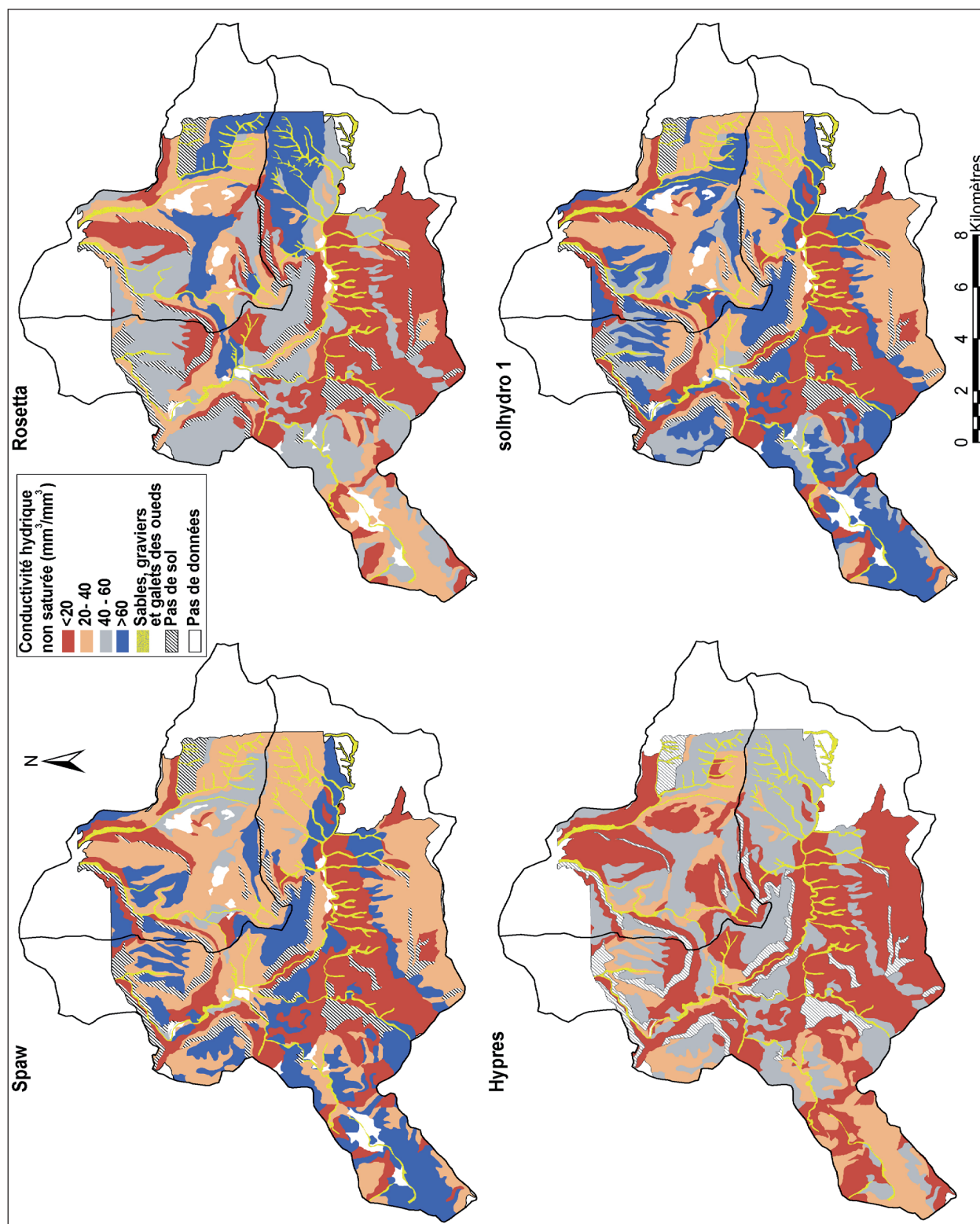


Figure 2.27 : Valeurs de la réserve utile selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Hypres, Rosetta, Solhydro 1) mai 2010.

« Rosetta » permet également de déterminer la conductivité hydrique non saturée des sols (figure 2.28). Cette information est primordiale dans notre cas d'étude, dans la mesure où les sols saturés permettent le développement d'un tapis herbacé pendant une période plus prolongée par rapport aux sols non saturés. Ce dernier permet la protection de sols qui le porte vis-à-vis de l'érosion et le dessèchement. En revanche, les sols non saturés sont desséchés en permanence à l'exception des périodes d'averses qui sont très ponctuelles dans le temps.

La figure 2.28, met en avant la distinction de la saturation de sols. Les sols présentant la saturation la plus élevée sont les rendzines colluviales caillouteuses peu encroûtées, les rendzines caillouteuses sur dolomies et basaltes, les sols rouges fersiallitiques décapités sur calcaires dolomitiques. Les sols moyennement saturés sont les sols bruns rouge fersiallitiques sur pélites, les sols rouges fersiallitiques lessivés sur grès dolomitique et calcaire. En ce qui concerne les sols non saturés, les sols bruns rouges fersiallitiques lessivés à horizon Bca sur calcaire dolomitique présentent les sols les moins saturés des sols traités. Cette caractérisation de sols sera exploitée dans la deuxième partie de ce travail. Elle sera intégrée dans l'évaluation du paramètre « sol ».

A partir de l'étude d'estimation des propriétés physiques de sols à l'aide des fonctions de pédotransfert, la méthode « Rosetta » livre des résultats intermédiaires par rapport aux autres « FPT », et permet de déterminer les valeurs de la conductivité hydrique non saturée des sols à l'exception des autres « FPT ». Le modèle « Rosetta » se caractérise par la bonne prise en compte de la texture des sols. Cette particularité oriente le choix de se baser sur les résultats de cette méthode dans l'évaluation de paramètre « sol » dans la suite (chapitre 3).

Conclusion

Les sols du massif des *Béni Snassen* se divisent en trois grandes unités : les sols à minéraux bruts, les sols calcimagnésiques et les sols fersiallitiques. Ces sols ne sont pas directement liés à la nature du substrat, toutefois les sols à minéraux bruts correspondent plutôt aux sols sur schistes, les sols calcimagnésiques sur calcaires dolomitiques et les sols fersiallitiques reposent sur les substrats schisteux basaltiques et calcaires (figure 2.11).

Une analyse bibliographique complétée par des études de terrains et des analyses de laboratoire ont permis l'identification des caractéristiques physiques de sols. La texture des sols du massif des *Béni Snassen* rentre dans la catégorie de sol argileux à argilo-limoneux.

L'étude des fonctions de pédotransfert a permis de reclasser ces différents types de sols selon leur *conductivité hydraulique* et leur *réserve utile* :

- la classification des sols selon la *conductivité hydraulique* montre que les sols rouges fersiallitiques lessivés sur marno-calcaire et les sols rouges fersiallitiques sur schistes altérés présentent une faible conductivité. En revanche les sols caractérisés par une conductivité hydraulique élevée, ont des teneurs élevées en sable. Les sols rouges fersiallitiques sur schistes présentent une conductivité élevée (cf. figure 2.24)
- la classification des sols selon la *réserve utile* montre que les rendzines encroûtées humifères, les sols rouges fersiallitiques lessivés sur marno-calcaire, les rendzines brunes humifères sur calcaire dolomitique, et les sols rouges fersiallitiques sur schistes présentent des valeurs élevées. Les autres sols présentent une faible rétention en eau (cf. figure 1.26).

La classification des sols à partir des fonctions pédotransfert « Rosetta » favorise la spatialisation du paramètre « sol ».

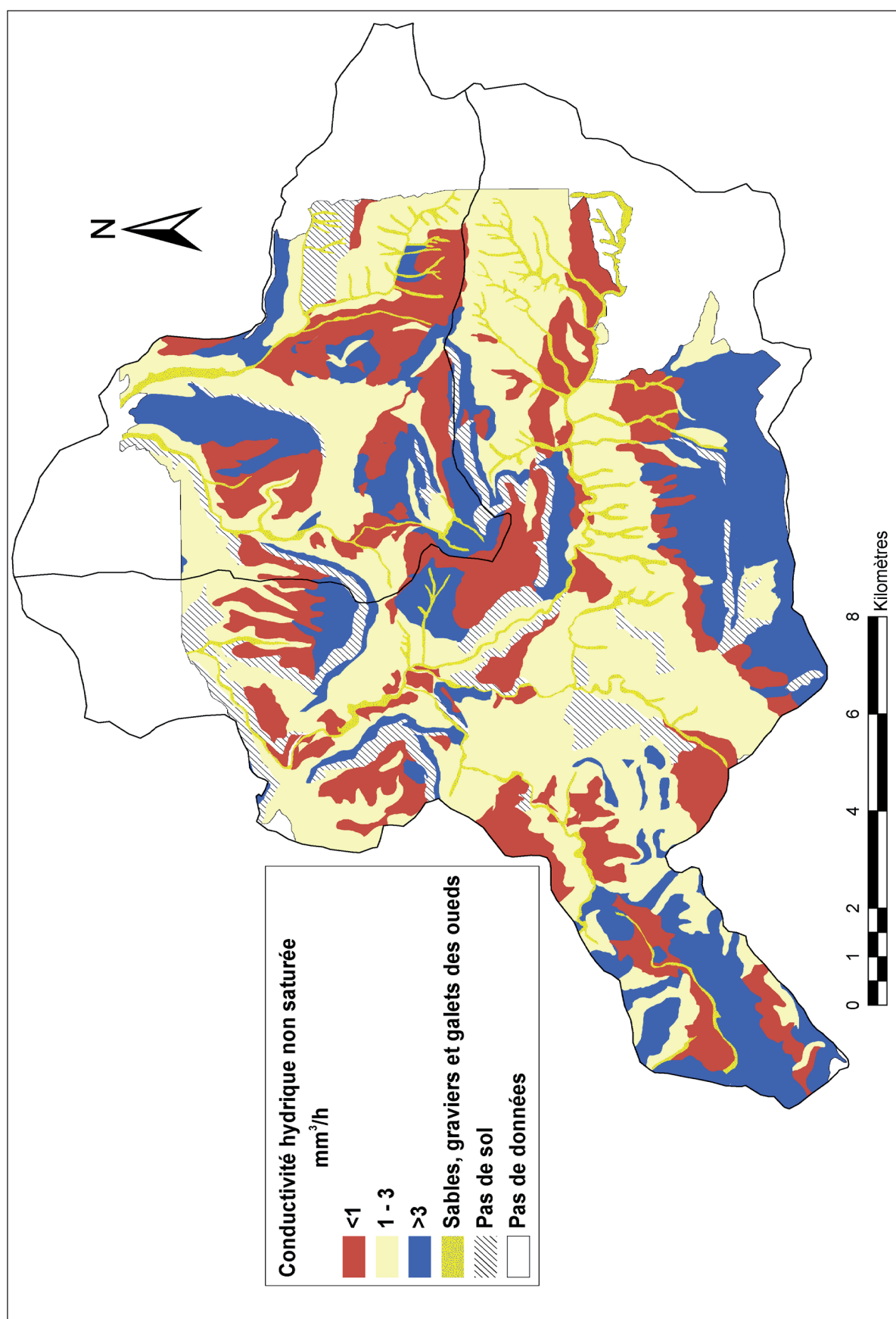


Figure 2.28 : Conductivité hydrique des sols non saturés selon Rosetta.

La carte de conductivité hydraulique (figure 2.25) constitue un élément essentiel dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques, dans la mesure où la couverture pédologique joue un rôle d'éponge vis-à-vis du karst sous-jacent et contrôle, en partie, l'écoulement et/ou l'infiltration des eaux de pluies.

Dans cette étude, nous avons spatialisé également l'épaisseur de sol. Ce paramètre est important dans l'étude de l'infiltration des eaux. Dans le cas où le sol est perméable, l'eau percole à travers la couche pédologique, impliquant deux conséquences :

l'eau s'infiltre en profondeur comme c'est le cas pour les calcaires dolomitiques qui sont tapissés par des lithosols et des sols rouges fersiallitiques ; pendant les périodes humides, l'infiltration devient préférentielle en empruntant les points faibles de la roche en place (les fissures et les fentes) ;

l'eau circule latéralement très lentement suite à l'imperméabilité de la roche en place ce qui donnera, pendant les périodes humides, une nappe perchée temporaire. Ce cas est rencontré par exemple dans les rendzines ravinées sur marnes.

L'effet de la végétation et notamment la végétation naturelle est important sur les caractéristiques et les propriétés physiques de sols.

Le croisement du variable « sol » avec ces deux paramètres « lithologie » et « végétation » et d'autres paramètres influençant celui-ci (activité anthropiques, formes géomorphologiques etc.) sera mis en avant dans la deuxième partie.

2.3. PARAMÈTRE « VÉGÉTATION »

Le couvert forestier est un des paramètres variables du système « vulnérabilité des eaux karstiques ». Il constitue un facteur naturel de protection. Il a un rôle déterminant dans la forme, la nature et la durée de l'infiltration de l'eau. En effet, lors des pluies, l'arrosage ne se fait pas sous la forme de « micro bombardement » plus ou moins violent, mais sous la forme d'une humectation régulière, le feuillage amortissant la violence des pluies en retenant une partie des gouttes de pluies (BENCHETRIT, 1972). En revanche, lorsque les pluies frappent directement un sol nu, l'eau ruisselle, ce qui provoque plutôt un écoulement torrentiel. Après la fin de l'averse et la division des eaux météorologiques par les végétaux, la durée de l'arrosage se prolonge en favorisant une meilleure absorption des eaux (BENCHETRIT, 1972).

La végétation intervient également dans le mécanisme de l'évaporation de l'eau superficielle en empêchant toute évaporation brutale de cette eau, pompée par les fortes chaleurs atmosphériques de la saison sèche succédant à la saison des pluies.

Donc la couverture végétale, surtout forestière, crée une véritable zone « tampon » entre les actions externes et le karst sous jacent. Le couvert végétal est considéré comme une couche intermédiaire entre la surface du sol qu'elle enveloppe et l'atmosphère, comme dit SCAETTA *et al.*, (1937) « *cette couche (couverture végétale) agit par rapport au sol comme amortisseur dont l'existence ou la disparition sont de nature à influencer directement l'action du climat atmosphérique sur le sol* ». Dans le cadre de cette thèse, nous ne prenons pas en compte le rôle de la végétation dans l'évapotranspiration, car l'objectif essentiel est de mettre l'accent sur le rôle protecteur de la couverture végétale vis-à-vis des modalités d'infiltration des eaux de pluie et le transport des matières en suspension. Le bilan hydrique n'est pas évoqué dans ce travail.

Dans cette partie nous allons étudier les caractéristiques du couvert végétal du massif des Béni Snassen. Cette forêt rentre dans la catégorie de la forêt méditerranéenne. Pour étudier la végétation du massif des Béni Snassen, nous allons nous focaliser sur les Béni Snassen orientaux et les Béni Bou Mahyou. Les Beni Bou Yahi ne sont pas pris en compte à cause d'un manque de

couvert végétal (figure 2.29).

Dans les Béni Snassen le couvert végétal occupe une superficie totale de 106 027 ha (Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997a). Compte tenu des conditions assez sèches, voire arides du milieu, la végétation forestière atteint un développement limité de 72 657 ha. Cette végétation est constituée de différentes espèces.

Afin de mieux appréhender le couvert végétal du massif des Béni Snassen, 4 points vont être abordés : (i) le peuplement, (ii) la législation forestière, (iii) les facteurs de destruction et (iv) l'évaluation de ce couvert depuis les années 40.

1. Etude des peuplements

Les essences forestières sont variées (figure 2.29). Cette variété est liée à l'interaction de différents paramètres : climat, sol, pendage, exposition, actions anthropiques, etc. Ces essences sont de type méditerranéen, à l'intérieur desquelles nous pouvons distinguer une végétation naturelle qui se développe et se reproduit elle-même : chêne vert, thuya, pin d'Alep, matorral, alfa, et les essences reboisées : pin d'Alep et eucalyptus.

Il est à noter que l'alfa est un couvert végétal non forestier puisqu'il est de la famille des graminées typiquement méditerranéennes.

Chêne vert

Le chêne vert se trouve parmi les essences essentielles du massif. Il occupe les stations favorables (versants frais et sols profonds). Il couvre une superficie de 9 353 ha. Il domine les pentes nord du Bou Zaâbel, Guedjane et Almou. Il s'étend également sur la ligne des crêtes sud (Ras Fourhal 1 532 m et Bou Zaâbel 1 435 m).

A l'ouest de Tafouralet, il forme un peuplement dense dans les Jorf el Abiod (1 139 m), et au sommet du Jbel Islane ou Lahmar (1 038 m) et Jbel Israne (787 m).

Thuya

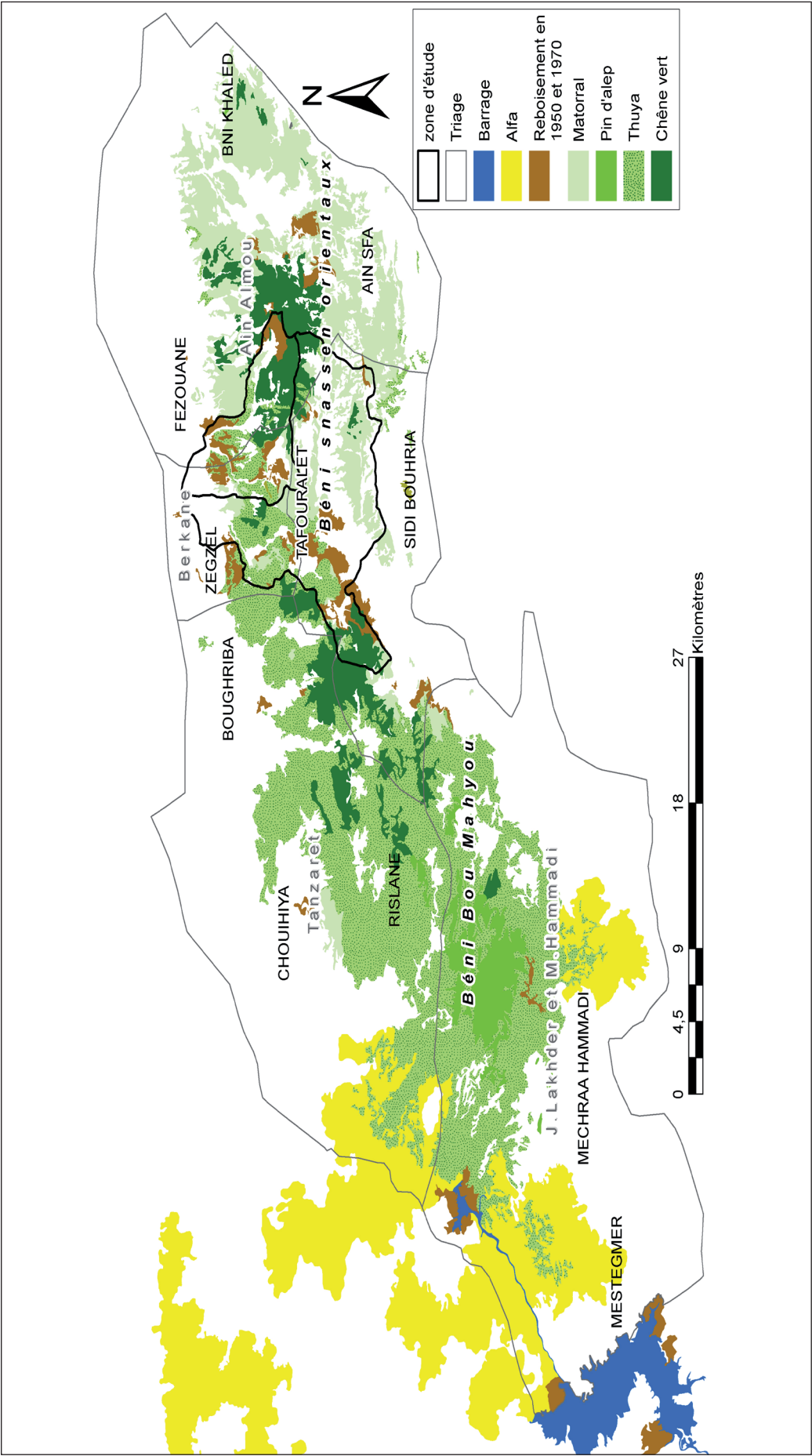
Plus bas en altitude, le thuya recouvre des surfaces importantes (37 465 ha). Il occupe Trharout, Jbel Arhil (939 m), Azrou Guidern (604 m), Jbel Achaoun (990 m), il forme une forêt claire dans Jbel Tamejout (1 065 m), Belaine (991 m) et Bou Hammed. Vers la partie occidentale du massif des Béni Snassen, dont le paysage est particulièrement aride, le thuya se trouve à l'état de broussailles.

Pin d'Alep

A l'ouest de Tafouralet subsistent quelques peuplements de pin d'Alep naturels de densité plus ou moins faible, généralement dégradés. Cette pinède couvre une superficie d'environ 3 707 ha. elle se développe sur des terrains marno-calcaires.

Matorral

Le matorral désigne une formation végétale méditerranéenne moins épaisse que le maquis. Il occupe une superficie de 16 988 ha, il se présente sous forme d'une mosaïque de formations végétales révélant tous les stades de dégradation.



Sources : Cartes de végétation Berkane et Al Youne 1/ 50 000 (1997)

Figure 2.29 : Couvert végétal Beni Snassen orientaux et Béni Bou Mahyou

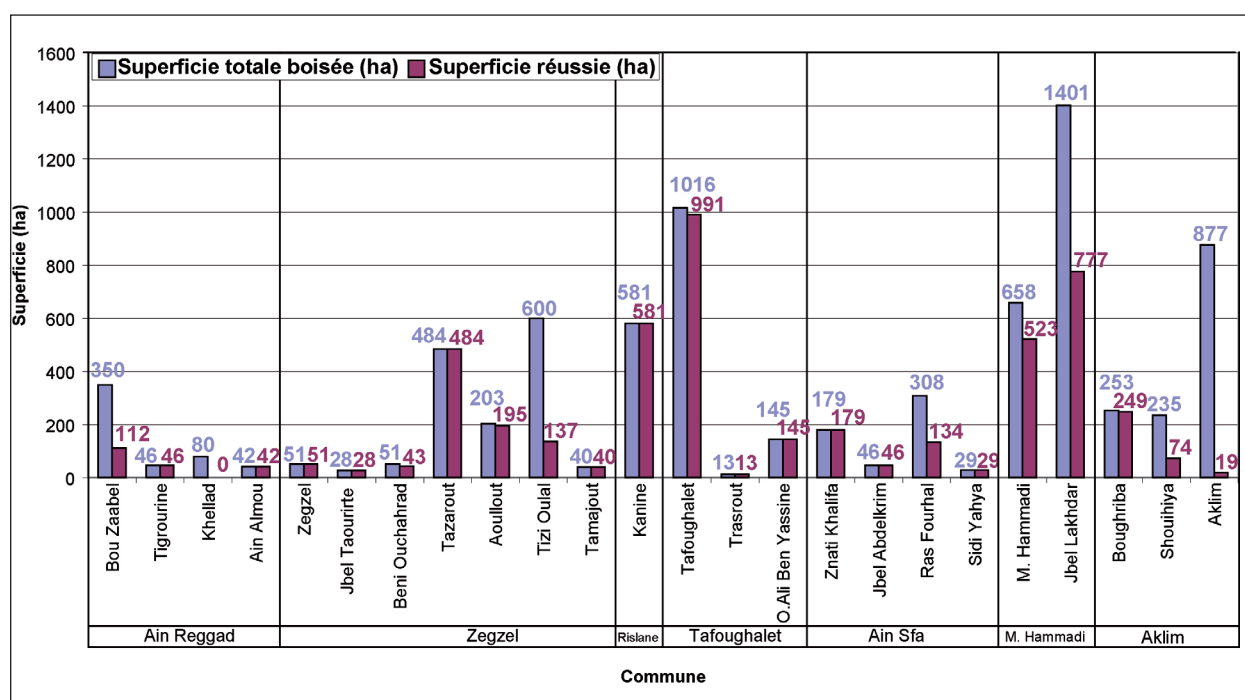
Pin d'Alep et eucalyptus (périmètre de reboisement)

Le massif a connu deux grandes campagnes de reboisement. A l'échelle du pays, les Béni Snassen se situent parmi les zones à forte densité de reboisement ; en surface, ils se situent à la deuxième place après la zone d'El-Jadida (Ouest du Maroc) (KAHOUADJI, 1986).

Reboisement des années 50

Les essences de reboisements plantées depuis 1950 sont constituées principalement de pin d'Alep et d'eucalyptus. Le périmètre de reboisement couvre une superficie de 7 716 ha dont 4 938 ha sont considérés comme un reboisement réussi.

Selon les statistiques des périmètres de reboisement des années 1950, le pourcentage de réussite est de 64% (figure 2.30).



D'après : (ZOUHRI Mars 1989)

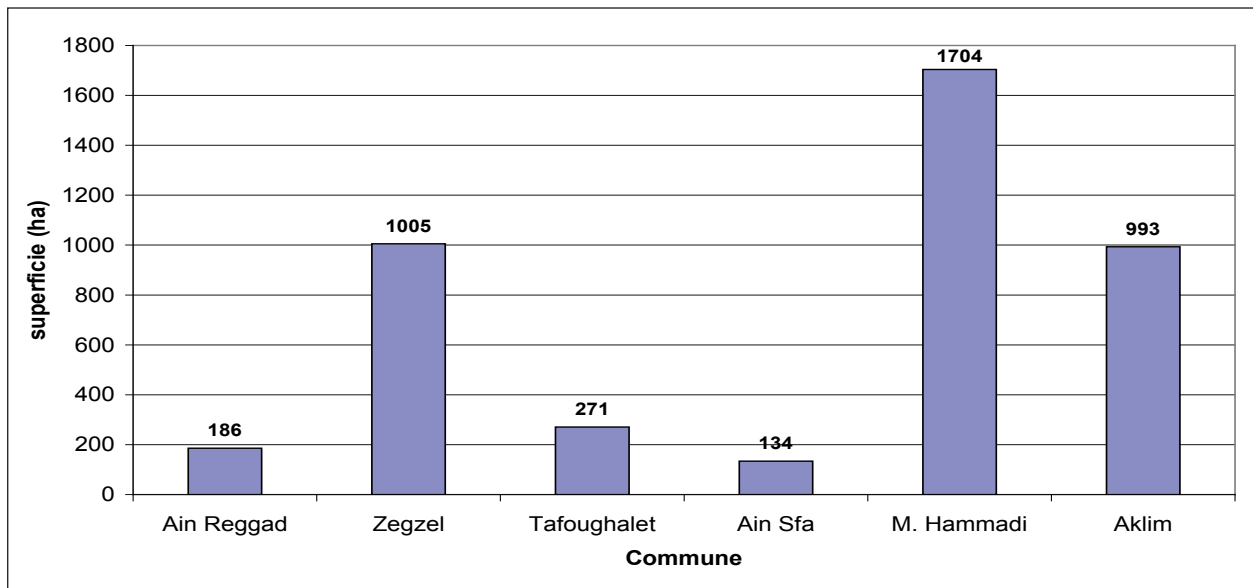
Figure 2.30 : Comparaison des superficies de reboisement et de réussite du reboisement dans le massif des Béni Snassen (années 1950)

Reboisement des années 70

En 1972, le Maroc a mis en œuvre un plan national de reboisement (PNR). Les objectifs de ce plan étaient le reboisement et la restauration des forêts dégradées. La figure 2.31 illustre la répartition des superficies boisées dans les Béni Snassen pendant les années 70.

Les essences utilisées, dans ces périmètres de reboisement, étaient le pin d'Alep et l'eucalyptus. Selon le (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole, 1995c), ces reboisements étaient très réussis à Tafouralet, moyennement réussis à Fezouane, Boughriba et Zegzel et faiblement réussis ailleurs.

En 1997 les périmètres boisés couvraient une superficie de 5 125 ha (Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997a).



D'après : (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole et al 1995c)

Figure 2.31 : Reboisement dans la forêt des Béni Snassen pendant les années 70 (Superficie totale reboisée 4 293 ha).

Alfa

C'est une plante steppique herbacée d'Afrique du Nord, appartenant à la famille des graminées. Elle est présente dans les Béni Snassen occidentaux. Cette concentration à l'ouest et au sud est liée à la sécheresse ; l'alfa est une plante d'étage climatique aride.

Ce peuplement alfatier peut être considéré comme des formes d'anciennes forêts disparues de genévriers, de thuyas, etc.

En Afrique du Nord, l'équilibre forestier est fréquemment rompu par l'élimination graduelle des essences principales auxquelles se substituent des formations secondaires de dégradation : matorral, alfa, etc. (BOUDY, 1952); l'alfa couvre une superficie de 33 370 ha dans les Béni Snassen occidentaux.

La superficie totale de la forêt du massif des Béni Snassen était de 64 000 ha en 1950 (BOUDY, 1952). En 1997 la forêt occupait une superficie de 72 657 ha. Ceci reflète les efforts de la gestion et la protection des ressources forestières.

A partir des années 1970, la société marocaine commençait à connaître des changements profonds marqués par un accroissement important des effectifs de la population et de ses besoins. Actuellement les besoins de consommation de la population augmentent de plus en plus. S'ajoute à ceci la sécheresse persistante des années 80 (cf. partie climat), qui a eu une influence sur les ressources naturelles du milieu : végétation, sol, aquifères, etc.

La question qui se pose est la suivante : est-ce que la gestion forestière a su s'adapter à ces nouvelles problématiques ?

L'étude historique de la législation forestière met l'accent sur les lois mises en place pour assurer une gestion durable de la forêt marocaine (annexe 13). Cette étude de réglementations et arrêts montre que les droits d'usage des forêts marocaines, sont déterminés et contrôlés par la loi depuis le début du XX^{ième} siècle. Sur le terrain, les indices de dégradation et de surexploitation de la forêt sont fréquemment visibles. Cette fragilité est due à la fois au non respect de la population locale de certaines réglementations et surtout au souci premier de subvenir à leurs besoins en ignorant la préservation et la protection de la forêt.

Malgré une législation et des décrets multiples, depuis un siècle, la population éloignée et marginalisée, ne se sent ni impliquée ni concernée, d'autant plus qu'un travail de prévention pédagogique n'a jamais été mis en place

2. Les facteurs de destruction de la forêt du massif des Béni Snassen

Les facteurs de déforestation résultent soit de l'action de l'homme, comme le défrichement, les délits forestiers, les incendies, le pâturage intensif, etc.; soit du milieu : conditions climatiques, nature de la végétation (DAHMANI, 1998).

2.1. Actions de l'homme

Les actions de l'homme peuvent être distinguées selon leur degré de gravité. Elles peuvent être classées comme : (i) actions majeures telles que le défrichement, l'incendie, le pâturage après coupe ou un incendie ; (ii) actions moyennes, à conséquences plus lointaines et dont la répétition dans le temps conduit aux mêmes résultats que les coupes et le pâturage ; (iii) actions mineures n'influençant qu'indirectement l'existence des peuplements : enlèvement des produits secondaires, cultures, contravention aux arrêtés divers de l'application de la loi forestière, etc. Dans le cas étudié ici, nous nous intéressons aux deux premiers types d'actions seulement.

La figure 2.32 montre les délits forestiers déclarés dans l'ensemble du massif des Béni Snassen : coupe ou enlèvement du bois, labour ou défrichement de forêt, incendies, etc. Les photos 2.4 (a, b, c) illustrent quelques exemples de la destruction de la forêt rencontrés dans les Béni Snassen.

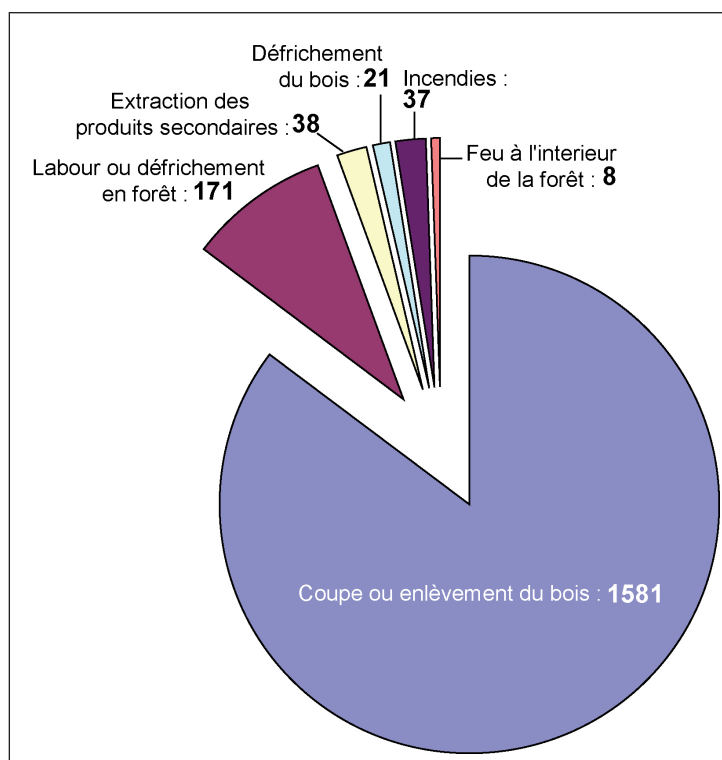


Figure 2.32: Cas déclarés des délits forestiers dans les Béni Snassen (1986/1994).

Source : (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole et al 1995c)

Coupe de bois

Le délit le plus fréquent, dans les Béni Snassen, est la coupe du bois avec 1 581 cas déclarés pendant la période (1986/1994) (figure 2.32). Ceci illustre l'image d'une montagne marocaine dont



Photo 2.4 : Quelques exemples de la destruction de la couverture végétale.

le bois de feu constitue la principale source d'énergie pour la cuisson, le chauffage, la construction des maisons, etc. Cette surexploitation est en effet associée à l'isolement et aux faibles ressources de la population locale.

La consommation du bois de feu est variable d'une commune à autre (figure 2.33). Nous constatons que la consommation totale du bois de feu s'élève à 114 723 t en 1995. Les communes de Chouhiya (36 022t /an) et Zegzel (32 207 t /an) représentent les consommations les plus élevées. En revanche, la commune de Rislane représente la consommation la plus faible (7 840 t /an) (figure 2.33). Cette différence de consommation est liée d'abord à la disponibilité du bois et à l'accessibilité de la commune aux zones urbaines; plus les communes sont éloignées plus la population surexploite les ressources naturelles. Cette figure met l'accent sur la forte consommation de bois d'origine forestière : dans la commune de Zegzel, 98 % de coupe de bois est de provenance forestière soit 32 377 tonnes. Le reste des communes observées présente une consommation de bois de forêt supérieure à 90 % à l'exception d'Aghbal et Machraa Hammadi qui enregistrent 88 et 57% respectivement. Ces chiffres reflètent la surexploitation de la forêt dans le massif des Béni Snassen. Une politique de gestion et de protection est indispensable pour assurer la durabilité de la forêt.

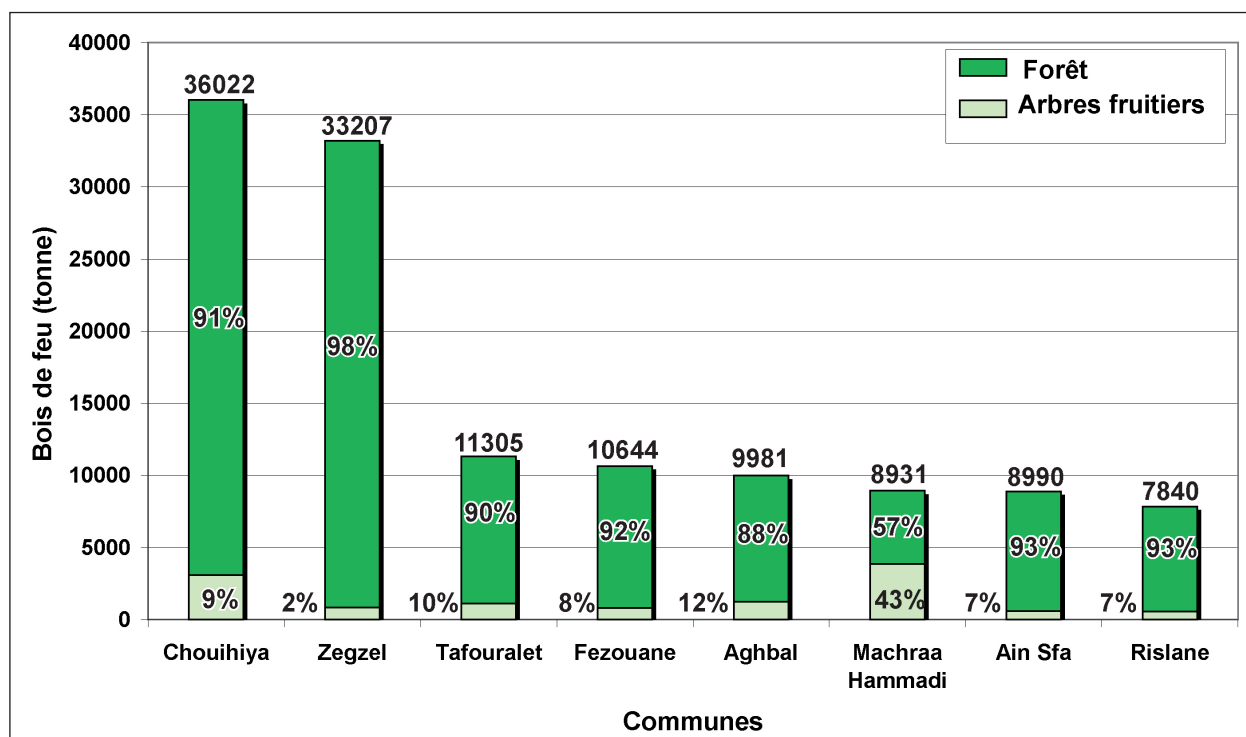
Défrichement

Le défrichement entraîne la disparition complète et définitive de la forêt. Selon BOUDY (1952) les défrichements les plus importants dans les forêts marocaines ont été effectués avant le protectorat. En ce qui concerne la forêt des Beni Snassen, pendant la période d'observation (1986/1994) 21 cas de défrichement de bois et 171 cas de labour ou de défrichement en forêt ont été déclarés (figure 2.33).

Incendies

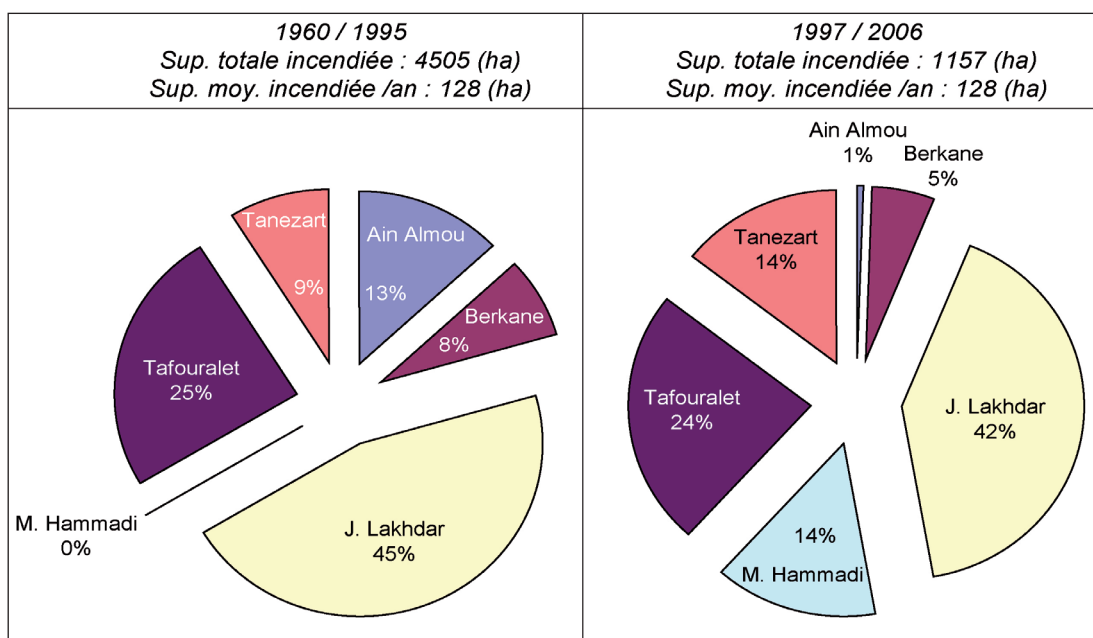
L'incendie est le danger le plus redoutable qui menace les forêts. Son intensité, sa brutalité, l'ampleur des surfaces parcourues dans un temps court font de lui le facteur le plus destructeur de la forêt. Les causes des incendies sont soit (i) d'origine anthropique provenant essentiellement de l'imprudence et de la négligence des bergers, l'exploitation de la forêt pour le charbon bois, les activités agricoles et touristiques, etc.; (ii) soit causés par le milieu physique : conditions climatiques et nature de la végétation.

Pendant la période d'observation (1960/1995) sur l'ensemble du massif des *Béni Snassen*, la superficie totale incendiée était de 6 460 ha, avec une superficie moyenne annuelle incendiée de 128 ha (figure 2.34). Pendant cette période la forêt a connu quatre incendies majeurs : en 1960, 660 ha ont été détruits, en 1966, 930 ha, en 1970, 2 110 ha et 1978, 1 220 ha. En revanche pour



Source : (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole et al 1995b)

Figure 2.33 : Consommation de bois de feu dans les Béni Snassen pour l'année 1995 (tonnes/an) : consommation totale 114 723 tonnes.



D'après : Commissariat aux Eaux et Forêts à la Lutte Contre la Désertification, 2006; Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole *et al.*, 1995a.

Figure 2.34 : Fréquence annuelle des incendies dans le massif des Béni Snassen (1960/2006).

le reste de la période d'observation les incendies n'ont pas dépassé les 200 ha /an (figure 2.34). Au cours de la période 1960/1995, une superficie totale de 6 460 ha a été ravagée par le feu. Les principales essences incendiées étaient le pin d'Alep, l'eucalyptus, le chêne vert et le thuya. La superficie incendiée de ces essences est de 6 400 ha, soit une superficie largement supérieure à celle considérée comme un reboisement réussi pendant la campagne des années 1950 qui représentent 4 938 ha. Pendant la période d'observation (1997/2006), la superficie incendiée est de 1 157 ha, la moyenne annuelle incendiée est de 128 ha, la même que celle de la période (1960/1995).

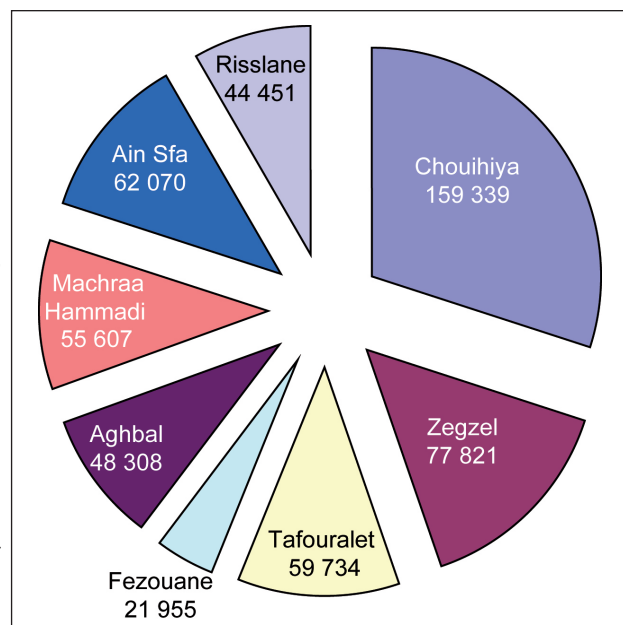
Ceci explique la stabilité de la superficie incendiée pendant 46 ans. A l'échelle des triages la fréquence annuelle des incendies est variable. Le jbel Lakhdar reste le plus touché avec 45% de fréquence annuelle des incendies pendant la période (1960/1995) et 42% pour la période (1997/2006) (figure 2.34).

Pâturage

La pratique de l'élevage dans les Béni Snassen est traditionnelle et largement contrôlée par les ressources naturelles, notamment forestières. La figure 2.35, met en évidence l'inégalité de la répartition du bétail.

La commune de Chouhiya possède l'effectif le plus important de 159 339 têtes de bétail sur un total recensé de 529 285 têtes. En contre partie la commune de Fezouane possède le plus faible effectif soit 21 955 têtes.

Figure 2.35 : Effectif du bétail dans la région des Béni Snassen (1995) total : 529 285 têtes.

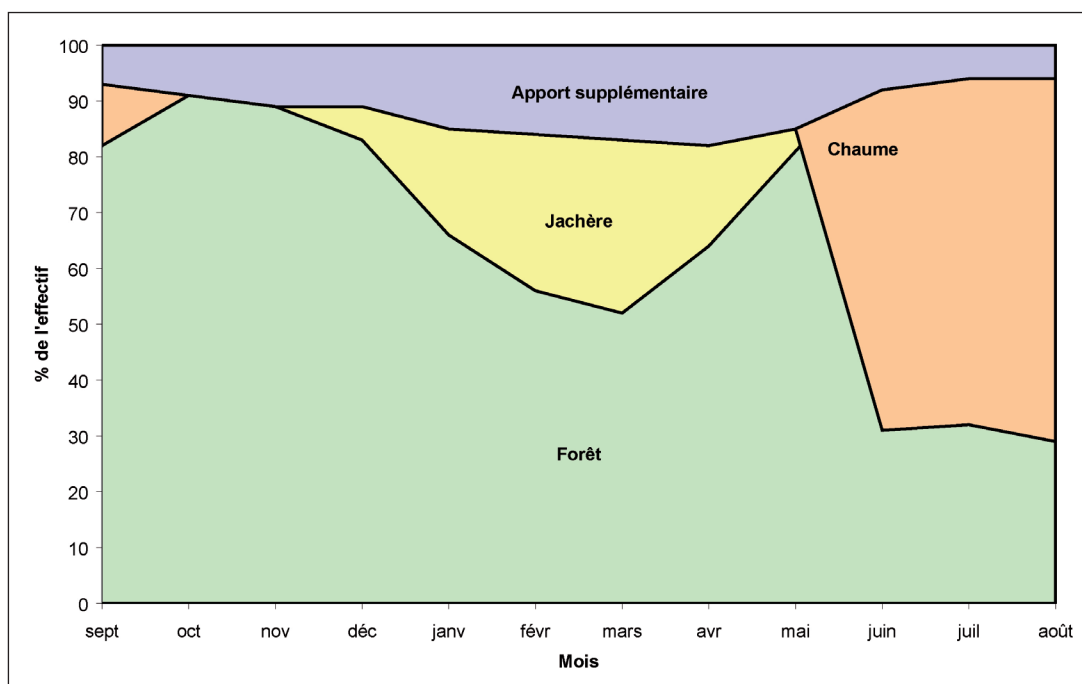


D'après : Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole *et al.*, 1995a.

D'après le Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole (1995b), la forêt apparaît comme étant la principale source fourragère du bétail. La forêt est pâturée toute l'année, elle est le principal espace pastoral pour le cheptel de la région (ET-TOBI *et al.*, 2000) (figure 2.36).

Le surpâturage en forêt est dangereux pour la forêt, dans la mesure où le bétail freine la régénération des plantes (CHALLOT, 1952). Pour un pâturage raisonnable, il est interdit d'accéder aux parcelles récemment exploitées, incendiées, etc.

En Afrique du Nord la durée de l'interdiction du pâturage pour favoriser la croissance des peuplements, a été fixée dans la loi forestière à 6 ans quelque soient les essences. Ce chiffre reste peu fiable, car l'âge véritable à partir duquel un boisement est défendable varie selon les essences : pour le chêne vert la croissance est lente, il faut au moins 8 ans, pour le pin d'Alep et le thuya 8 ans



Source : (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole *et al.*, 1995)

Figure 2.36 : Calendrier fourrager selon les sources alimentaires (% de l'effectif/mois).

à 10 ans au moins sont nécessaires (BOUDY, 1952).

Ces règles ne sont quasiment pas respectées dans la zone d'étude ; après les coupes et les incendies les parcelles sont immédiatement pâturées après les premières poussées. Donc le pâturage excessif transforme la forêt en forme de végétation régressive telle que le matorral et l'alfa. Dans son travail, (VIDAL, 1952) souligne la législation et les pratiques définies au Maroc pour un pâturage encadré en forêt. Ces dernières restent à ce jour quasiment ignorées par la population locale.

2.2. Actions du milieu

Les actions du milieu qui agissent sur la destruction de la forêt dans les Béni Snassen sont les conditions climatiques et la nature de la végétation.

Les conditions climatiques

La forêt des *Béni Snassen*, au même titre que les forêts méditerranéennes, se trouve exposée aux risques d'incendie en raison des conditions climatiques qui s'expriment par une sécheresse sévère (moins de 20 mm/mois). Cette sécheresse couvre quatre mois par an en moyenne (de juin à septembre) (cf. partie climat). Ces conditions sont la cause principale de la fréquence et l'intensité des incendies.

La nature de la végétation

La nature de la végétation de la forêt a également une grande influence. Les boisements les plus sensibles et les plus vulnérables, dans lesquels l'incendie se propage avec plus de rapidité et de violence sont le pin d'Alep et l'eucalyptus. Ces essences couvrent une superficie totale de 8 832 ha. Viennent ensuite le chêne vert qui couvre une superficie de 9 353 ha et le thuya qui occupe une

surface considérable 37 465 ha. Le matorral a également, une grande sensibilité aux feux de forêt. Il occupe une superficie de 16 988 ha (cf. tableau 2.5 et figure 2.29).

Tableau 2.5 : Répartition du couvert végétal dans les Beni Snassen orientaux et les Béni Bou Mahyou (1997).

	Espèce	Superficie (ha)
Végétation naturelle	chêne vert	9 353
	Thuya	37 465
	Pin Alep	3 707
	Matorral	16 988
	Alfa	33 370
	Autres feuillus	18
Reboisement	Eucalyptus, pin alpes	5 125
Total	Forêt	72 657
	Végétation	106 027

D'après : Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997a., 1997b

3. Evolution du couvert végétal dans la zone d'étude

Dans cette partie nous menons une étude comparative de l'évolution du couvert végétal dans la zone d'étude : les bassins versants de Zegzel et de Béni Ouaklane.

Cette étude est basée sur différentes étapes :

- collecte de cartes de périodes différentes : Taourirt 1/200 000 (Institut Géographique National, 1946), Oujda 1/200 000 (Institut Géographique National, 1949), Berkane 1/200 000 (Institut Géographique National, 1954), Berkane 1/100 000 (Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques *et al.*, 1970), carte de végétation Berkane 1/50 000 (Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997a) et carte de végétation El Ayouné 1/50 000 (Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997b). Ces cartes permettent de comparer trois périodes différentes : carte des années 1940/1950, carte de 1970 et carte de 1997 et ceci par :
- vectorisation des cartes collectées à l'aide du SIG ;
- analyse, comparaison et croisement des cartes.

3.1. Critique de données

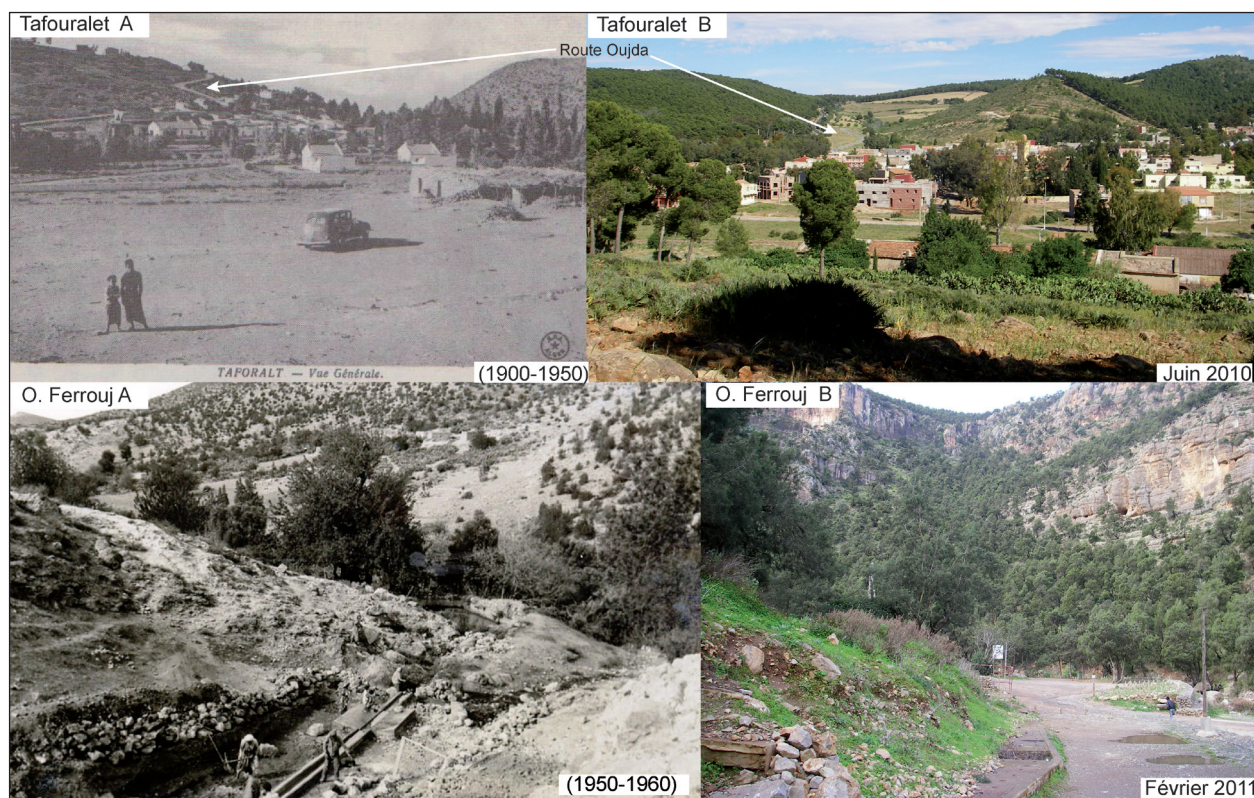
Il est important de signaler que les cartes de végétation de 1997 sont à une échelle plus fine. Elles permettent d'avoir plus d'informations sur la nature et la superficie de chaque essence.

Pour confirmer la variabilité de la superficie du couvert forestier pendant les trois périodes comparées, nous avons procédé à une démarche de collecte de photos aériennes. Malheureusement, cette démarche n'a pu aboutir à cause des difficultés d'accessibilité aux données et aux complexités des démarches administratives

Pour valider les cartes de référence et notamment les plus anciennes, la confirmation du changement spatial du couvert végétal s'est limitée à la comparaison de photographies anciennes et actuelles (photo 2.5).

Ces illustrations montrent que la forêt est renforcée grâce à deux facteurs :

- *campagnes de reboisement* (cas de Tafouralet) : la photo 2.5 de Tafouralet A montre que le couvert végétal, autour de Tafouralet, était faiblement présent pendant les années 1950, en



Source : Tafouralet A (Les enfants de l'oriental, 1988) ; Zegzel A : archive université de Mohamed Premier Oujda)

Photo 2.5 : Rôle du reboisement dans la répartition forestière.

revanche, la photo 2.5-Tafouralet B prise en 2010, illustre que la couverture végétale gagne d'avantage de terrain. Le développement de la forêt est lié aux campagnes de reboisement des années 1950 et 1970 (cf. carte (2.29) ;

- la forêt *gagne également sur les zones de pâturage délaissées ou limitées* à cause de l'apparition d'autres activités économiques : tourisme et pratiques agricoles rentables [néfliers], (cas de l'oued Ferrouj). La photo 2.5, oued Ferrouj A montre que pendant les années 1950/1960 le couvert forestier était très dégradé à cause de la surexploitation de la forêts à des fins pastorales et énergétiques. La photo 2.5-oued Ferrouj B qui date de 2011 illustre que la végétation est relativement dense. Dans un espace marginalisé, dont le souci principal de la population est de subvenir à ces besoins, les pratiques anthropiques influencent donc d'une manière directe le développement du couvert forestier.

3.2. Cartes collectées

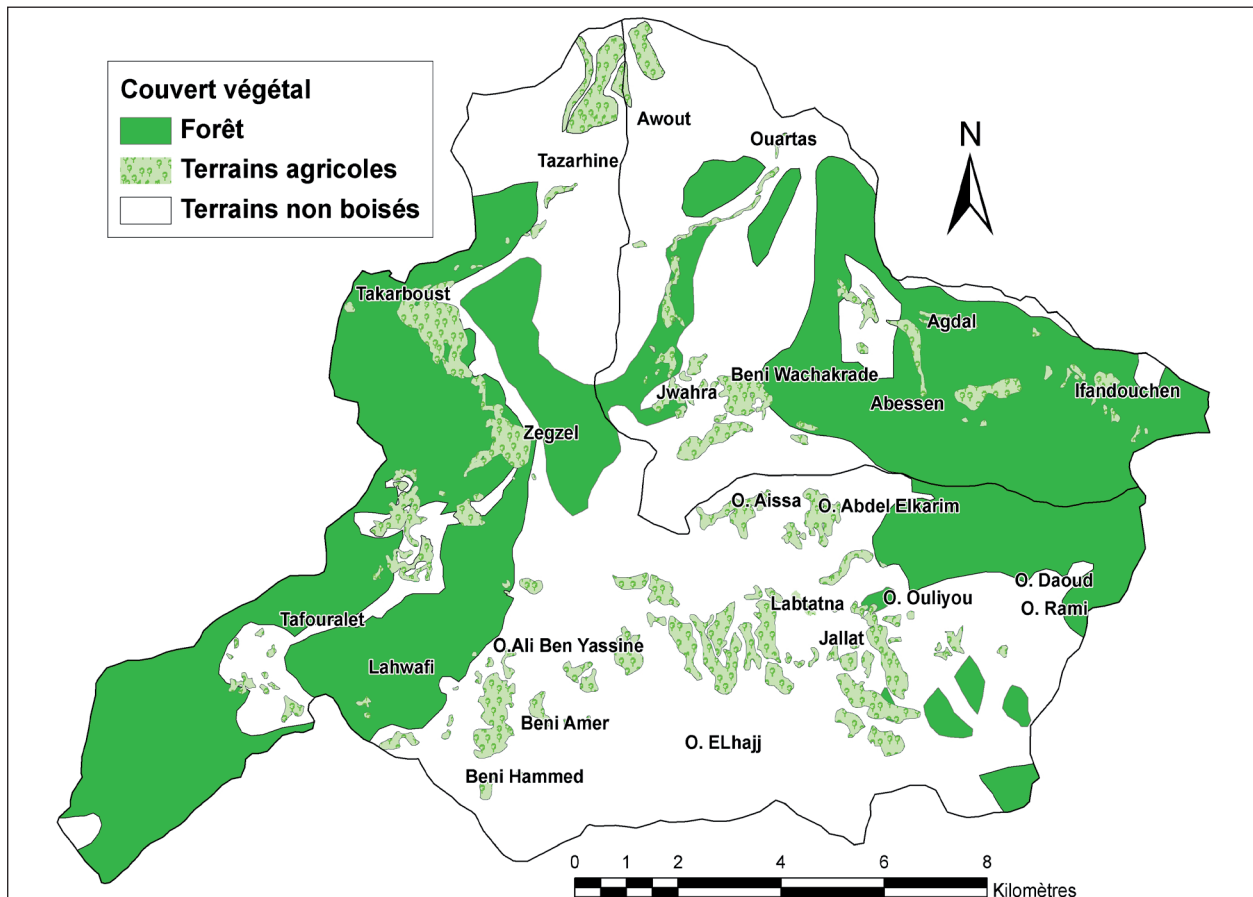
Dans cette démarche, le mode typologique choisi de la végétation repose sur une typologie cartographique simple basée su trois critère : (i) bois (forêt) ; (ii) terrains agricoles et (iii) terrain non boisés.

Carte des années 1940

La combinaison de trois cartes IGN Taourirt 1/200 000, Oujda 1/200 000 et Berkane 1/200 000 (Institut Géographique National 1946, 1949, 1954) a permis l'obtention d'une carte de végétation

simplifiée (figure 2.37). La totalité des données concernant le couvert forestier est extraite des deux cartes Taourirt et Oujda qui date des années 1940. Les données extraites de la carte de Berkane (1954) informent sur les terrains agricoles situés au nord d'Awlout.

La superficie boisée pendant cette période est de 8 096 ha sur une superficie totale des bassins versants de 18 942 ha. Donc, 57% ne sont pas boisés. Pendant cette période le massif des Béni Snassen a connu les premiers reboisements des années 1950 (cf. figure 2.31).

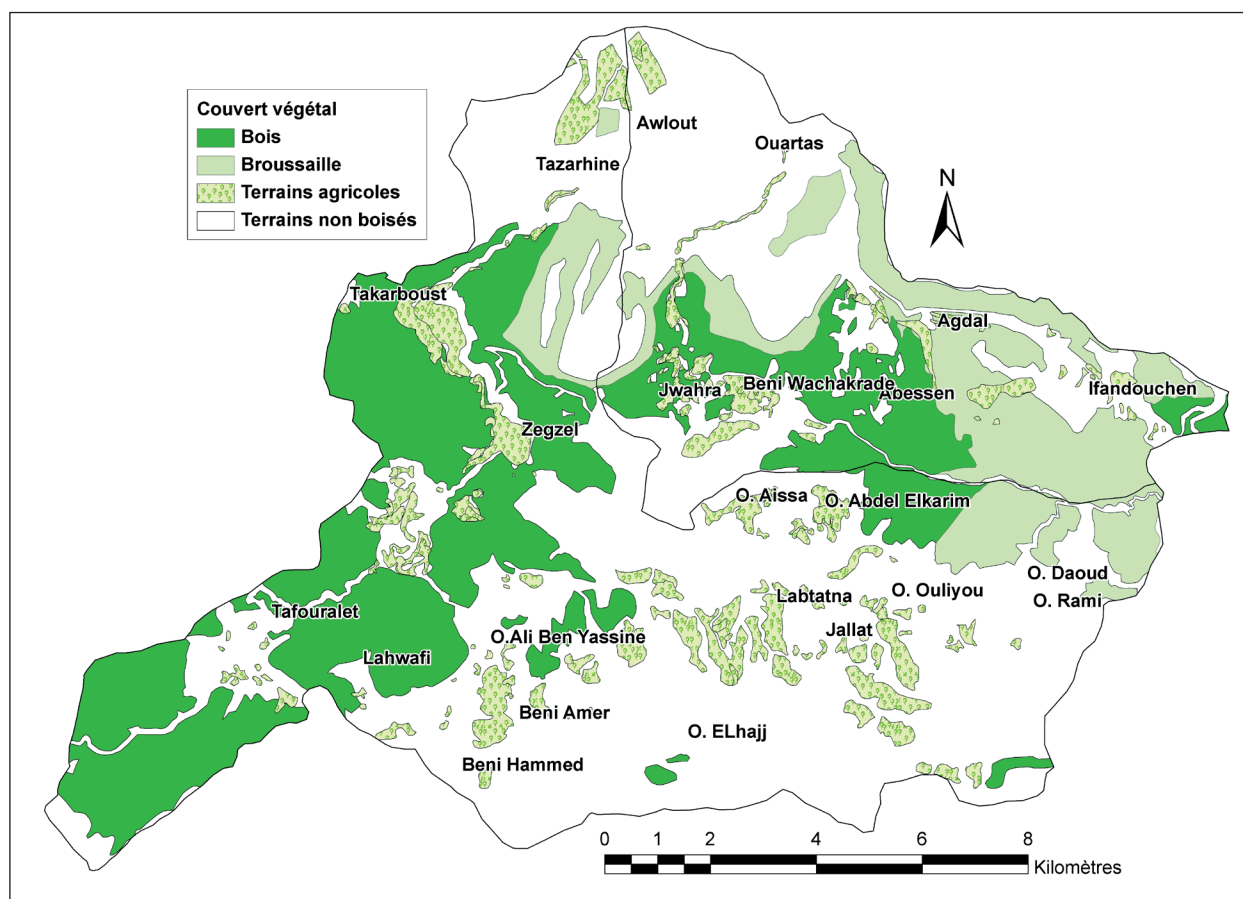


Source : (Institut Géographique National 1946, 1949, 1954)

Figure 2.37 : Couvert végétal dans les deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane(1940/1950)

Carte de l'année 1970

Cette carte a été effectuée à partir de la carte Berkane 1/100 000 (Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques et al 1970) (figure 2.38). La superficie couverte en 1970 représentait 7 347 ha. Ceci signifie que 61% de la surface de la zone d'étude n'est pas forestière par rapport à 57% pendant les années 1940. Cette diminution est liée à la surexploitation de la forêt. Pendant la fin des années 1960 et les années 1970, la population marocaine a connu à la fois un accroissement démographique important et un changement profond dans son mode de vie. Ceci a engendré une surexploitation de toutes les ressources naturelles, notamment la forêt. Pour la préservation de la forêt le gouvernement marocain a mis en place le PNR (cf. figure 2.31).



Source : (Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques et al., 1970)

Figure 2.38 : Couvert végétal dans les deux bassins versants Zegzel et Beni Ouaklane (1970)

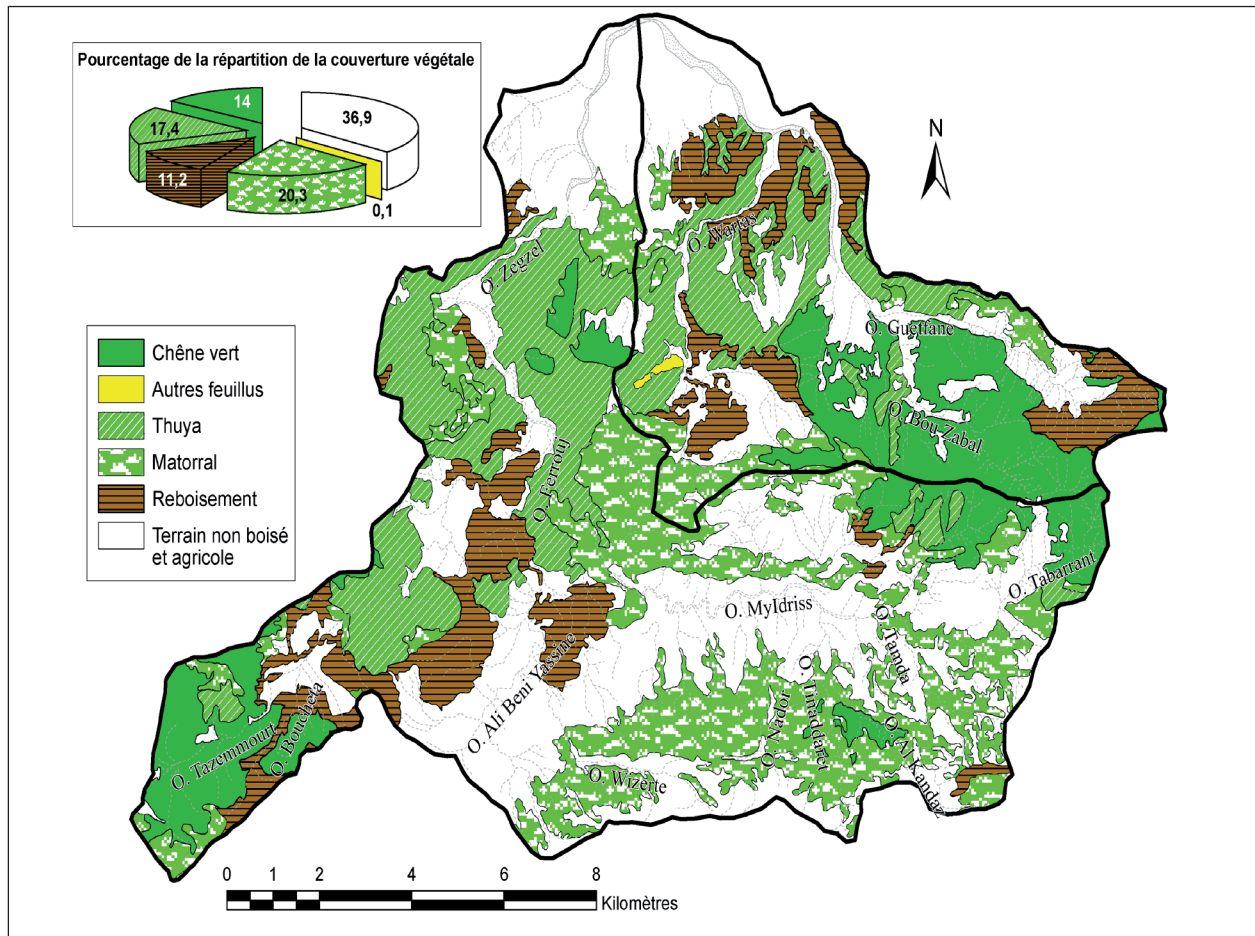
Carte de l'année 1997

Les deux cartes de végétation Berkane et Al Yaoune 1/50 000 (Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997b), ont permis l'obtention d'une carte précise et détaillée du couvert végétal (figure 2.39).

Pendant l'année 1997, le couvert forestier représentait une superficie de 11 942 ha sur 18 942 ha. 37% de la zone d'étude présente des terrains non boisés et agricoles, le reste est couvert par une forêt constituée essentiellement des essences suivantes : matorral (20.3%), thuya (17.4%), chênes verts (14%), et des zones de reboisement artificiel : pin d'Alep et eucalyptus (11.2%). Le périmètre de Tafouralet est le périmètre le plus favorable au reboisement selon les observations de la DREF sur les deux campagnes majeures de reboisement (années 50 et années 70).

3.3. Etude comparative

Le SIG permet de croiser les trois cartes et de comparer l'évolution du couvert végétal (figure 2.40). Pendant les années 1940/1950, la forêt représente 8 096 ha, soit 43 % de la superficie totale de la zone d'étude. Cette superficie a baissé pendant l'année 1970 pour atteindre 7 347 ha, ce qui représente 39 %. En revanche pendant l'année 1997 la forêt représente une superficie assez étendue de 11 942 ha soit 63 % de la zone d'étude.



Source : (Direction régionale des Eaux et Forêts 1997a, 1997b)

Figure 2.39 : Répartition de la couverture forestière dans la zone d'étude (1997)

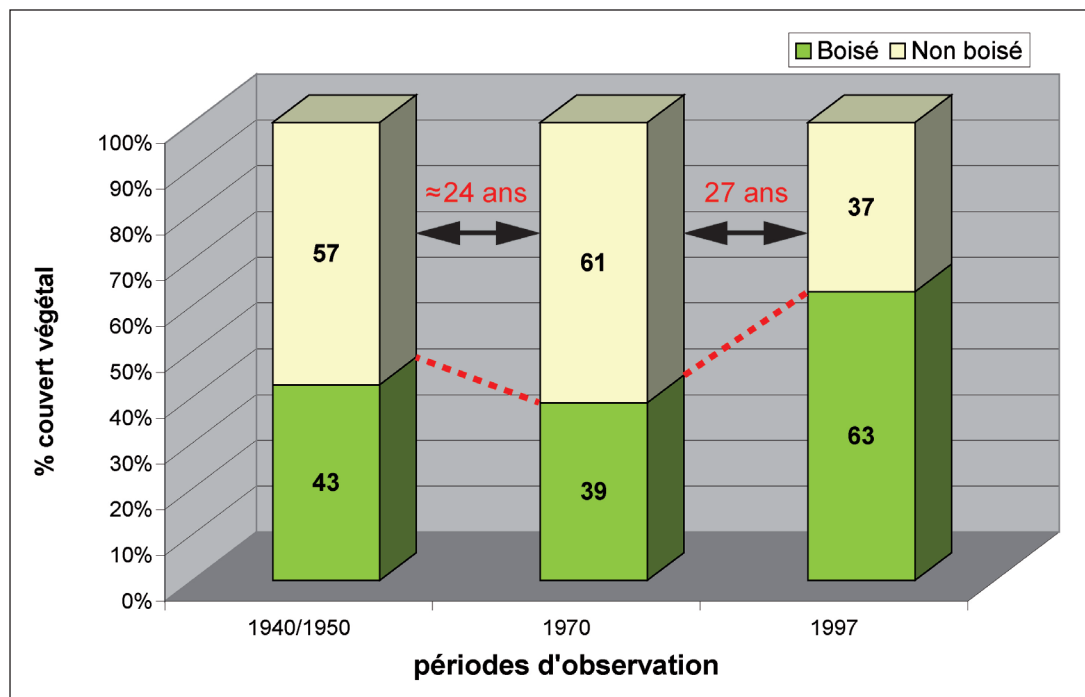


Figure 2.40 : Comparaison du couvert végétal (1940/1950, 1970 et 1997)

Conclusion

L'étude de l'évolution du couvert végétal montre qu'entre les années 1940 et 1997 le rapport de la surface boisée s'est inversé positivement (43% pendant les années 40 et 63% en 1997).

Cependant, le reboisement régulier et assez réussi ne pourra pas négliger une sensibilisation plus fine à l'attention d'une population ignorante de la durabilité des ressources naturelles. De plus, la sécheresse persistante depuis les années 80 et l'ouverture de la montagne aux nouveaux projets touristiques laisse craindre une destruction de la forêt notamment par les incendies (cas de juin 2006) (communication orale Commissariat aux Eaux et Forêts à la Lutte Contre la Désertification).

Le changement de la superficie de la forêt est lié aux points suivants :

- **Les Campagnes de reboisement** ont joué un rôle important dans la répartition de la végétation (5 125 ha est la superficie reboisée en 1997). Les photo 2.5 (A et B Tafouralet), illustrent l'influence des reboisements pour le maintien de la forêt dans le massif des Béni Snassen. Ce massif prend la première place en ce qui concerne les périmètres de reboisement purement forestiers à l'échelle du pays (Direction des eaux et forêts et de la conservation des sols 1981).
- **Rôle socio-écomonique** : la forêt constitue la principale source d'énergie par le bois de feu (cf. figure 2.32) et la principale source fourragère du bétail (cf. figure 2.36). En 1970 la forêt était surexploitée à cause de la forte demande et des exigences de la population. Ceci a engendré une baisse de la superficie reboisée.
- **Rôle de la législation forestière** : bien que la détermination de droits d'usages de la forêt fût établie à l'aube du XX^{ième} siècle, ces lois sont peu appliquées par la population. La préservation et la protection de la forêt n'est pas le premier souci d'une population éloignée, marginalisée et non impliquée dans la prise de décisions.
- **Exode rural et changement d'activités anthropiques** : les années 1980 ont connu un pic d'exode rural dans certaines zones du massif des Béni Snassen. Le départ de la population a été motivé par plusieurs facteurs : la sécheresse accentuée qui a servi facteur déclenchant, à laquelle s'ajoute d'autres facteurs comme le manque d'infrastructures (écoles, routes, services publics, etc.). La déprise de ces territoires a favorisé le développement de la forêt dans les zones de pâturage. Le changement des activités économiques (apparition du tourisme dans la vallée de Zegzel par exemple) a permis le délaissement des activités traditionnelles (ramassage du bois, pâturage en forêt). Ce nouveau comportement a favorisé la préservation et le développement d'une forêt.

Le couvert végétal constitue un facteur de protection naturel des aquifères karstiques par son rôle déterminant dans la forme, la nature et la durée de l'infiltration de l'eau. Son évaluation pour apprécier la vulnérabilité des ressources en eau est indispensable. L'évaluation spatiale et temporelle du paramètre « couvert végétal » sera abordée dans la deuxième partie.

2.4. PARAMÈTRE « ACTIVITÉS ANTHROPIQUES »

Le Maroc connaît une croissance démographique élevée et un développement socio-économique assez soutenu, ce qui provoque une forte pression sur les ressources naturelles et une dégradation multiforme de l'environnement. La rupture de l'équilibre économique traditionnel, dès le début du XX^{ème} siècle, à cause du changement du mode de vie de la population, a provoqué un déséquilibre important sur les ressources naturelles : sol, forêts, ressources en eaux, etc. L'homme par ses exploitations, passées et actuelles, amplifie la dégradation et le déséquilibre des ressources fragilisées par les conditions naturelles du milieu (irrégularité pluviométrique, sécheresse prolongée, couche pédologique, couvert végétal peu développés, etc.).

L'aspect anthropique présente une influence indirecte dans la vulnérabilité des ressources en eau karstiques. Il constitue une contrainte externe du système. Il se manifeste soit par les pratiques et les activités de l'homme sur le milieu soit par les décisions politiques qui sont généralement prises par des acteurs externes du système (les colons français, les décideurs d'aménagement de territoire marocains). L'interaction des différents paramètres du sous système anthropique et leur évolution historique et spatiale sont à l'origine de la situation actuelle de l'organisation spatiale de la région Nord-Est du Maroc. Pour comprendre les causes du déséquilibre territorial de cet espace, une approche géographique et historique s'avère nécessaire.

Cette partie se focalise sur l'évolution et la dynamique territoriale et anthropique dans le massif des Béni Snassen. Pour mieux apprécier cette évolution, nous proposons une étude diachronique composée de quatre grandes périodes.

Avant d'aborder ces phases majeures, il est indispensable de préciser que le massif des Béni Snassen constitue un foyer préhistorique. La série de fouilles réalisées dans le site archéologique de Tafouralet depuis 1951 par l'abbé Roche (pour la première fois) met en évidence l'existence de restes osseux de 86 adultes et de 98 enfants. Cette grotte révèle l'existence d'une occupation humaine d'environ 12 000 ans BP (KÉFI *et al.*, 2005).

Il est important de signaler également que le massif des Béni Snassen était occupé par une population berbère qui porte ce nom. Une minorité a intégré cette tribu, depuis les premières arrivées des Arabes musulmans au Maroc au VII^{ème} siècle. Ce groupe est considéré comme sacré « Chorfa¹ » et occupait un statut social particulier du fait de leur descendance du prophète : ils ne paient pas d'impôts, ne font pas partie des armées de la tribu ne participent pas aux travaux collectifs et ils occupent des espaces riches en ressources naturelles (eau et terrain agricole). Actuellement ils occupent le village de Zegzel.

Les quatre grandes périodes qui ont guidé le changement du système anthropique dans le massif des Béni Snassen entre la fin du XIX^{ème} siècle et l'actuel sont : la période précoloniale (la montagne constituait un espace fermé assez équilibré grâce à une gestion collective du milieu par la population locale), la période coloniale (destruction de l'équilibre traditionnel par l'intervention des colons français), la période post-coloniale (surexploitation et dégradation des ressources naturelles à cause du changement de mode de vie) et la période actuelle (prise de conscience de la dégradation du milieu et de la nécessité de l'intégration de la population locale dans la prise de décision et le développement d'une économie soutenable).

1. Epoque précoloniale

Cette partie donnera un éclairage sur la relation de la population du massif des Béni Snassen avec son entourage avant le choc colonial. Cette époque se divise en deux grandes phases d'avant

1. Forme dialectale de shurafa, pluriel de sharīf (chérif). Ce sont les descendants du Prophète et de sa fille Fatima.

la fin du XIX^{ième} siècle et pendant la fin de celui-ci.

1.1. Avant la fin du XIX^{ième} siècle

Jusqu'à la fin du XIX^{ième} siècle, le massif des Béni Snassen connaissait un équilibre des structures sociales. Cet équilibre se traduisait par l'appropriation et la maîtrise très profonde du milieu naturel par l'homme. L'acquisition des savoirs-faire, depuis de longs siècles, est un témoignage vivant de cette maîtrise : développement des techniques agraires, maîtrise de la distribution et la gestion d'eau à l'échelle des douars², préservation du sol par des pratiques anti-érosives, conservation de la forêt et présence de terrasses de cultures irriguées par séguia³. La présence de l'eau a favorisé la sédentarisation des populations en montagne et le développement d'une agriculture variée : légumes, fruits, céréales et élevage. Les montagnards ont été, donc, considérés par la population des plaines, comme des modèles pour l'apprentissage des techniques agricoles grâce à leurs savoirs-faire (CHATTOU, 1998). Le système appliqué, demandait une énergie importante, ce qui a engendré une implication des jeunes dans la production locale. Leur insertion, dans le système tribal et familial, ne favorisait pas leurs départs vers d'autres destinations.

L'équilibre territorial était maintenu grâce à la gestion collective du milieu par la jmaâ⁴. Cette organisation territoriale prenait en compte le maintien de l'équilibre entre la population et les ressources naturelles et par conséquent participait à la stabilité du milieu.

La structuration organisée et la sédentarisation des populations peuvent être expliquées par la combinaison de plusieurs facteurs : (i) le peuplement de la montagne : à la fin du XIX^{ième} siècle, les montagnes des Béni Snassen présentaient de plus fortes densités de population et des terroirs mieux organisés que dans les plaines des Triffa (CHATTOU, 1998), (ii) l'abondance de la main d'œuvre, (iii) l'existence d'une entité commune et solide, (iv) la présence d'une unité territoriale et économique (les ressources naturelles appartiennent à la communauté) et (v) enfin l'obligation de vivre dans un espace fermé « **montagne refuge** » dans la mesure où les plaines étaient occupées par les nomades arabes et constituées d'espaces non sécurisés pour les montagnards (figure 2.41- 1).

Pendant cette époque, la seule « ouverture » de la tribu des Béni Snassen, était des pratiques de cultures de blé et d'orge très limitées sur les superficies proches du pied de montagne. A ce stade, les plaines constituaient donc un complément saisonnier mais primordial, pour garantir un équilibre des ressources naturelles pour la montagne.

Il est important de signaler que les basses terres avaient toujours été inhabitées par les tribus berbères, en raison de l'insécurité qu'y faisaient régner les nomades Arabes notamment dans la plaine des Angad. En effet, les tribus d'Angad ont été chargées, par le sultan Moulay Ismail IV, de contenir les habitants des Béni Snassen en montagne afin de les empêcher de contrôler les circuits commerciaux avec l'est et le sud du Maroc (CHATTOU, 1998). De ce fait, les habitants du massif ont été plutôt tournés vers une exploitation de la plaine des Triffa.

La division politique et économique plaine/montagne a engendré la division ethnique suivante : les Arabes en plaine et les Berbères en montagne. A partir de ce fractionnement politico-économique et ethnique, on déduit que les plaines constituaient une frontière pour les montagnards.

2. Commune rurale regroupant plusieurs familles et formant ainsi une fraction d'une tribu.

3. Canal d'irrigation à ciel ouvert.

4. Conseil de notables et personnes âgées du douar

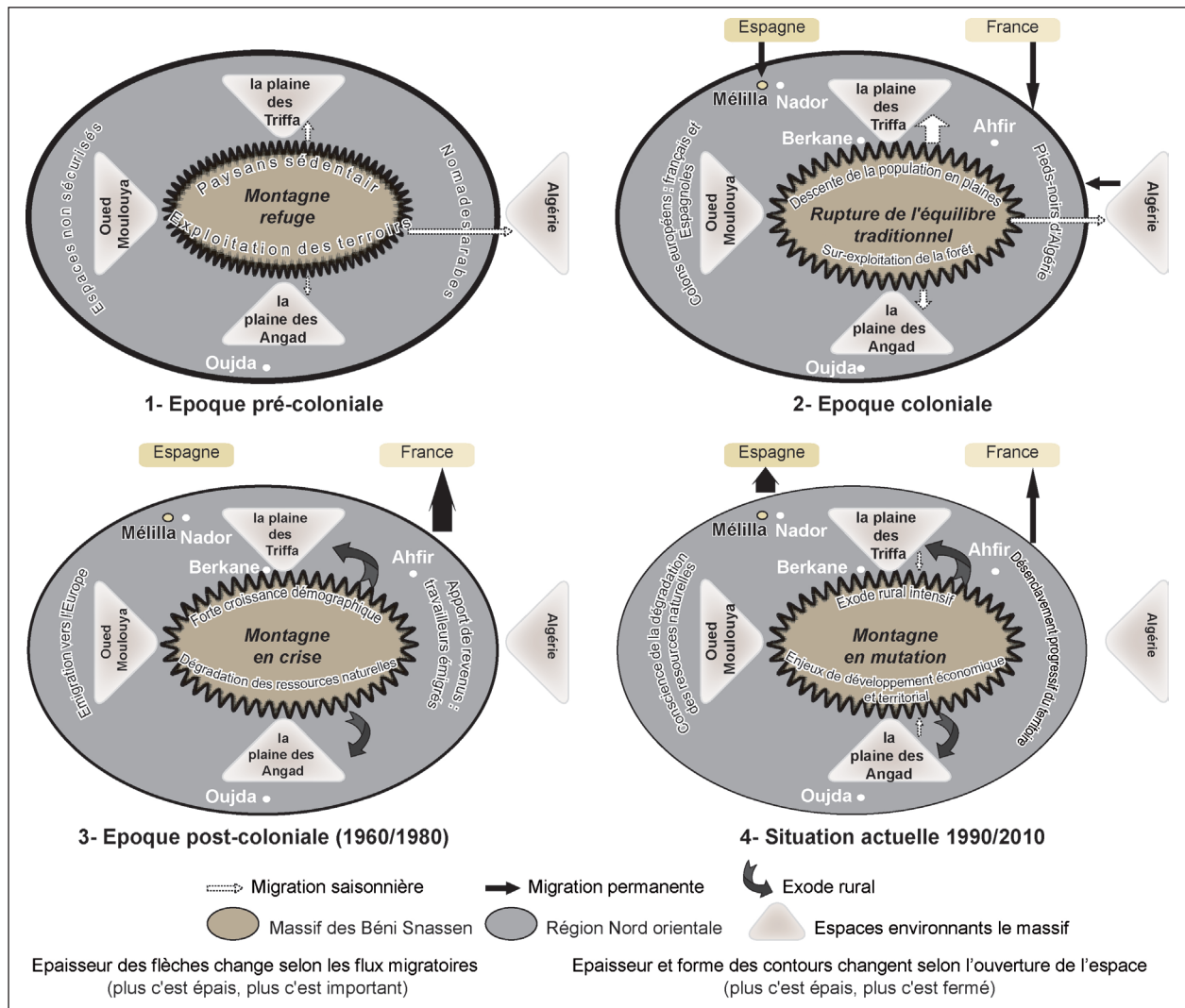


Figure 2.41 : Evolution de l'organisation territoriale du massif des Béni Snassen et son environnement.

1.2. Fin du XIX^{ème} siècle

La population des Béni Snassen commence à s'ouvrir sur d'autres territoires. Cette ouverture se fait en deux temps :

Réseau commercial avec les tribus arabes

En plus des pratiques agricoles, qui ont été appliquées (depuis toujours, en plaine mais sans contact avec les Arabes) à la fin du XIX^{ème} siècle ces deux populations qui occupaient des milieux opposés (montagne/plaine) et qui ne disposaient pas des mêmes richesses (fruits et légumes pour la montagne, céréales et bétail pour la plaine) développaient un réseau commercial, d'où la première ouverture des Béni Snassen sur une population voisine mais méconnue.

L'échange commercial et l'émigration saisonnière vers l'Algérie

La proximité des Béni Snassen avec l'Algérie, déjà sous occupation française, a favorisé les circulations commerciales entre les deux sociétés. Par exemple les produits des Béni Snassen étaient admis à franchir la frontière dès 1867, tandis que les droits de douane étaient imposés sur les produits d'autres provenances (CHATTOU, 1998).

Cette période a connu également une mobilisation saisonnière de la main d'œuvre montagnarde vers les fermes des colons français. Les échanges commerciaux et l'ouverture des jeunes montagnards ont favorisé la création de nouveaux besoins ce qui s'est traduit par le départ de certains jeunes vers le marché du travail algérien, géré par des colons français. Cette migration a engendré la décomposition de la société des Béni Snassen, un nouveau contexte de mobilité des montagnards et le déséquilibre du système traditionnel.

2. La période coloniale (1912-1956) : première rupture de l'organisation spatiale traditionnelle du territoire

Le choc colonial a bouleversé l'équilibre traditionnel du massif des Béni Snassen. Cette partie, permet de mettre l'accent sur l'organisation spatiale du territoire et les conséquences de la pénétration française (figure 2.41-2).

La région orientale est la première unité territoriale marocaine soumise à la domination coloniale. La déclaration du protectorat officiel de la France sur le Maroc a été prononcée en 1912. Par contre, l'entrée militaire dans la région date de 1907. Les premières motivations de la pénétration militaire française dans la région des Béni Snassen étaient la présence d'une tribu assez forte qui multipliait les révoltes, les appels à la guerre contre la France en Algérie et le soutien à la résistance algérienne.

Très vite, après 1907, l'opération militaire encourage les colons d'Algérie à s'approprier les terrains de la plaine des Triffa « la concentration des terres coloniales privées a atteint 20 000 hectares en 1913 sur les 30 000 hectares cultivables, soit toutes les terres riches de la plaine des Triffa » (MAHLA, 1984).

Il est important de rappeler que jusqu'à la veille de la pénétration française, la plaine des Triffa demeurait un ensemble de forêts et de prairies sauvages, à l'exception des superficies proches du pied de montagne où la population arabe se contentait d'une exploitation pastorale extensive sans transformation importante du milieu naturel et où les montagnards berbères pratiquaient des cultures de blé et d'orge très limitées (CHATTOU, 1998). L'implantation des colons français a été accompagnée par une série d'aménagements : infrastructures routières, équipements hydrauliques, déforestation, etc.

A partir de l'intervention des colons (par le développement de la propriété privée de la terre) le refoulement des populations en montagne et la surcharge démographique qui s'en est suivie, l'équilibre ancien s'est rompu et la dégradation des ressources naturelles s'est accélérée.

La pénétration française, constituée essentiellement des « pieds-noirs » d'Algérie, a touché les plaines et les montagnes et elle a engendré un changement profond de l'équilibre du système traditionnel.

La complémentarité économique entre les deux régions frontalières (le Maroc oriental et l'Oranie) se présentait sous différents angles : appropriation de terres par les colons de l'Ouest algérien, forte immigration des Algériens musulmans et des pieds noirs français, émigration saisonnière de la main d'œuvre agricole travaillant chez les colons de l'Oranie, nomadisme des tribus frontalières, etc. Ces échanges ont été favorisés par deux axes de communication majeurs : la route impériale et la voie ferrée Marrakech-Gabes par Oujda et Oran.

La division coloniale du Maroc a classé le Maroc oriental dans la catégorie du « Maroc non utile » (GUITOUNI, 1995b). Grâce à sa proximité géographique avec l'Oranie qui constituait un pôle d'activité économique et à cause du classement en dehors des terres fertiles marocaines, le Nord Est du Maroc était alors tourné vers l'Algérie. La situation marginale du Maroc oriental est la conséquence de plusieurs décisions politiques et socio-économiques : déplacement du centre de

gravité politique et économique du Maroc vers le littoral moyen atlantique à la suite du transfert de la capitale de Fès à Rabat (décision prise par Lyautey) en 1912, le choix de Casablanca comme port national et donc métropole économique et la présence de l'occupation espagnole dans le Rif.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux effets de la colonisation sur les zones montagneuses. Pendant la période coloniale, la montagne a connu une série de bouleversements qui ont conduit, peu à peu, à la situation actuelle. Le déséquilibre en montagne s'est fait à plusieurs niveaux :

2.1. La destruction du système tribal

Pendant cette période de « **rupture de l'équilibre traditionnel** », les ressources des Béni Snassen n'ont pu subvenir aux besoins de la population ce qui s'est manifesté par des violences entre les tribus et au sein même des tribus (conflits entre les tribus des plaines et des piémonts, repoussées par le manque des terres fertiles d'une part et la tribu de montagnes en pleine crise due à la désorganisation politique, spatiale et économique, d'autre part). Ces circonstances ont été accompagnées par la nomination des caïds⁵ qui a favorisé des crises géopolitiques au sein de la tribu qui refusait la perte de sa souveraineté politique et sa solidarité traditionnelle. La conséquence de cette déstabilisation a été que la jmaâ a perdu, ainsi, sa fonction de direction des affaires du groupe. Sa place a été prise par les caïds.

2.2. La destruction du système socio-économique

Jusqu'à la veille de la pénétration française, la montagne était la zone la plus peuplée et elle représentait le centre de la vie économique et sociétale pour sa population locale. Avec le nouveau contexte géopolitique, la montagne devient dépendante de la ville pour répondre à ses besoins.

Le changement socio-économique passe par plusieurs phases :

Fragilité de la structure socio-économique en montagne

Les jeunes montagnards émigraient occasionnellement vers la plaine des Triffa (Photo. 2.6) et vers l'Algérie pour travailler dans l'agriculture. Le temps de travail variait entre trois et six mois. Les populations les plus affectées par l'émigration sont particulièrement les Béni Snassen du Sud où 44% de la population était concernée. Ceci s'explique par le fait qu'aucune forme d'activité économique moderne ne s'est implantée dans cette région aride. Les Béni Snassen de l'est sont également touchés par l'émigration. Les travailleurs, de cette zone, migrant essentiellement vers l'Algérie représentaient 14% de la population. La première motivation était la proximité géographique de l'Algérie et l'intéressant marché du travail développé par les colons (figure 2.42).

La démarche de la recherche du travail à l'extérieur du massif du Béni Snassen, établie par les jeunes de ces deux régions, a constitué le début d'un exode rural qui s'est amplifié pendant les années 1960. Ces zones délaissées, partiellement, à l'aube du XX^{ième} siècle, représentent les premiers foyers du départ définitif vers les pôles économiques.

Les Béni Snassen du Nord ne présentaient que 6% de population émigrée. La richesse du milieu par la présence des ressources en eau et de terres agricoles ont minimisé le départ des jeunes. A ceci s'ajoute les travaux d'aménagement réalisés : construction de la route Tafouralet-Berkane via Zegzel, création des périmètres de captage des eaux des sources, des séguias et l'entretien des séguias existantes.

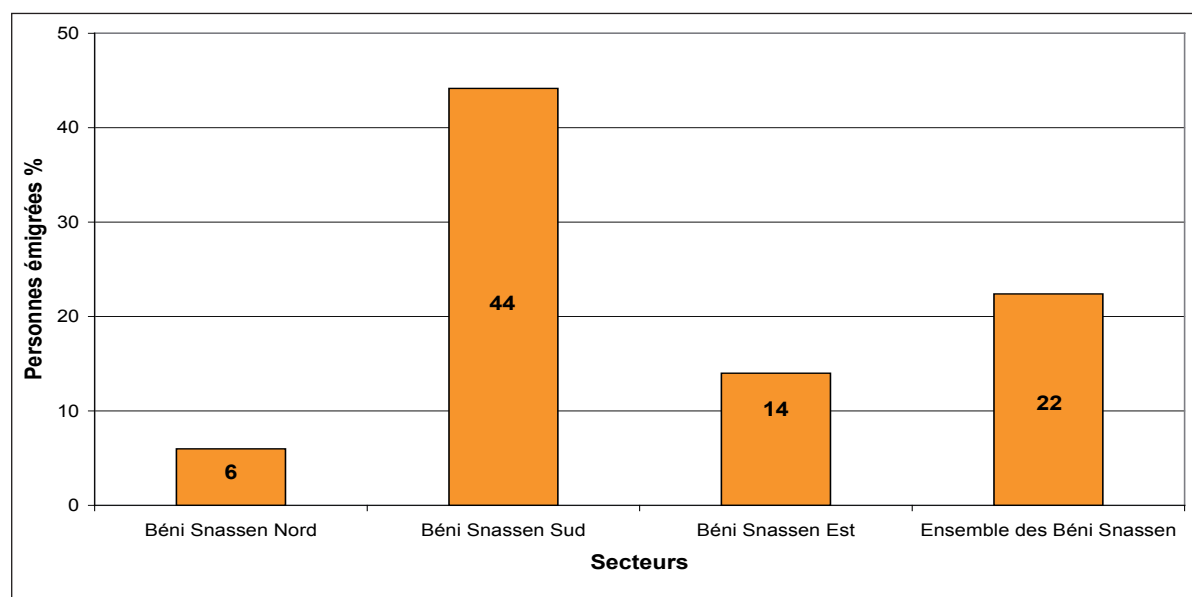
5. Un notable qui cumulait alors des fonctions administratives, judiciaires, financières et parfois de chef de tribu.



(PRODIG)

Photo 2.6 : Défrichement et épierrement du piémont nord du massif des Béni Snassen par les paysans marocains (période coloniale).

Cette migration a provoqué un double processus contradictoire : d'une part, elle a permis le maintien de l'agriculture en montagne grâce, au déplacement temporaire de la main d'œuvre, d'autre part, elle a introduit les éléments d'une décomposition et d'une rupture de la dépendance des montagnards vis-à-vis des apports externes.



(MAHLA, 1984)

Figure 2.42 : Emigration temporaire annuelle chez les Béni Snassen (1945).

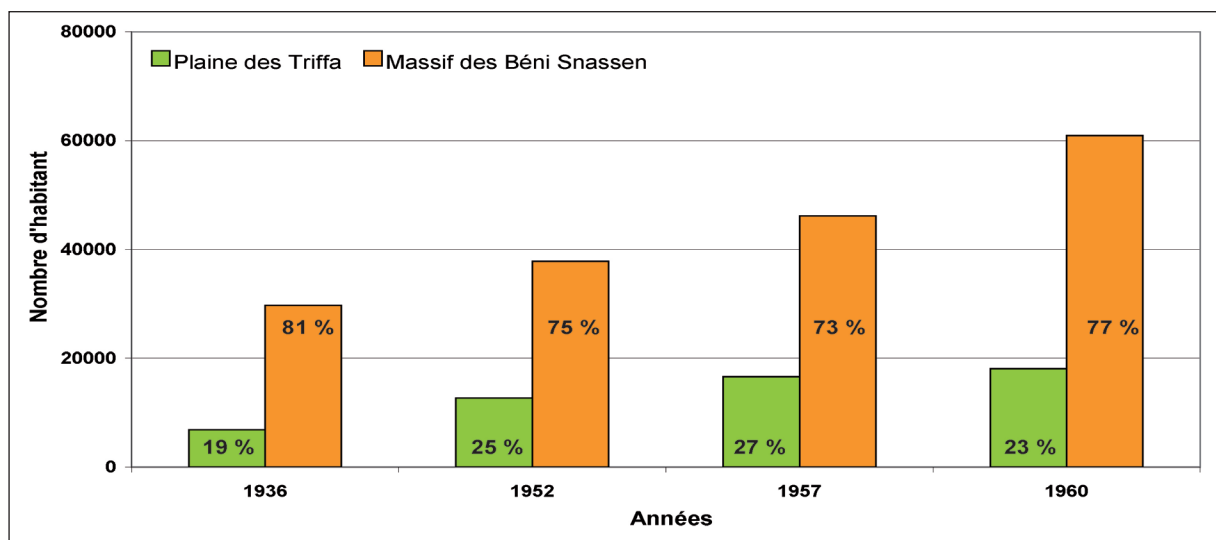
Rupture de la structure socio-économique en montagne

Dans un deuxième temps, le déplacement des jeunes montagnards dans les plaines pour travailler dans les fermes coloniales a rompu la solidarité de la famille et a constitué une forme d'initiation à des départs définitifs pour ces émigrés.

D'autre part, la population des Béni Snassen a été multipliée par deux pendant la période de 1936/1960 en passant de 29 755 à 60 942 (figure 2.43). Le graphe illustre également, que la plaine gagnait d'avantage de population : 19% en 1936 par rapport à 23% en 1960. Il est important de souligner que pendant les premières décennies de la colonisation les habitants de la plaine de Triffa étaient constitués essentiellement d'européens, « en 1926 près de 50% des habitants de Berkane et Ahfir étaient des européens, mais en 1951, 72% de ces villageois étaient marocains » (CHARVET, 1970).

Cette phase n'a pas connu un exode rural intensif. Jusqu'aux années 1960, la population de montagne se contentait d'une production traditionnelle avec une émigration saisonnière des jeunes.

Bien que le travail temporaire constituait un réel apport externe pour subvenir aux besoins de la population en montagne, la pression démographique a engendré de graves conséquences sur les ressources naturelles et notamment la forêt qui présentait une source d'énergie gratuite.



(MAHLA, 1984)

Figure 2.43 : Evolution de la population dans le massif des Béni Snassen et la plaine des Triffa (1936/1960).

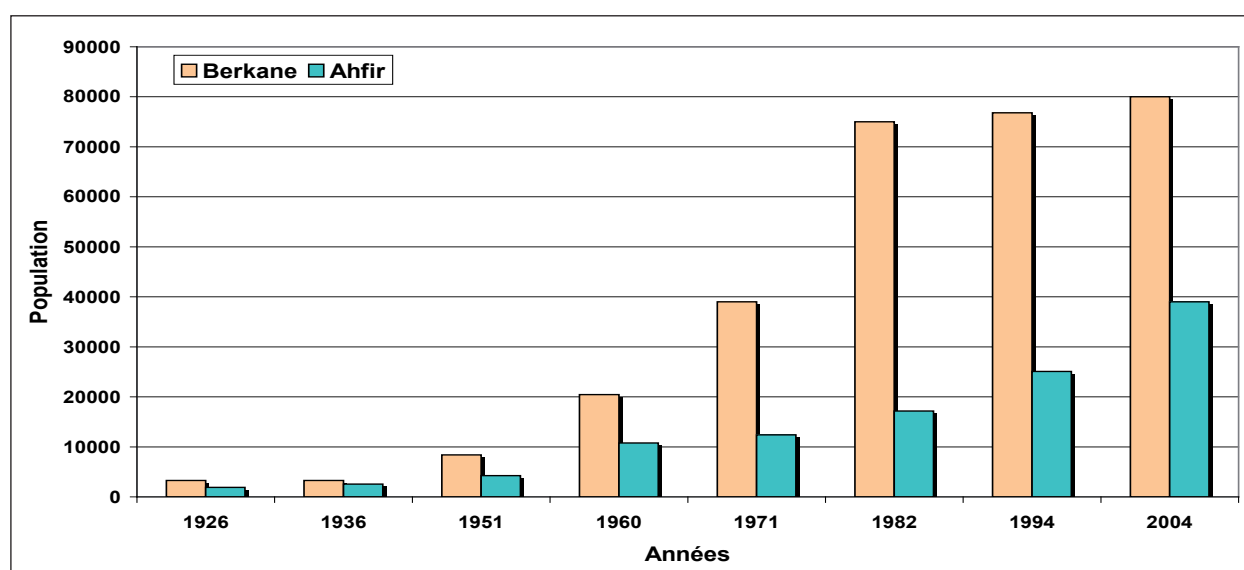
La création, par les colons, d'un marché du travail en plaine a favorisé l'installation de la main d'œuvre dans ce territoire et a traduit la marginalisation de la montagne. L'introduction d'un mode de production de type capitaliste a engendré la rupture de l'équilibre traditionnel. Les rapports sociaux qui ont existé sous la colonisation avaient une base matérielle nouvelle. Le salariat est devenu l'élément essentiel de la production du capital. Les formes d'entraide et de solidarité dans le travail ont disparu petit à petit, alors que des formes individuelles de travail apparaissent avec force. La rupture socio-économique, a favorisé le déplacement de l'activité agricole de la montagne vers la plaine.

A ceci se rajoute l'interruption de la relation complémentaire plaine/montagne, à cause de l'appropriation des terrains par les colons. Ces deux facteurs ont produit une surexploitation des ressources naturelles en montagne, depuis la fin du XIX^{ème} siècle, la forêt a commencé à être

entamée, par des défrichements, des petites parcelles dispersées furent mises en cultures par les paysans (CHATTOU, 1998). Pour minimiser les dégâts sur la forêt, des campagnes de reboisements ont eu lieu pendant les années 1950 (cf. partie végétation).

Le développement des infrastructures routières, des équipements agricoles dans la plaine des Triffa et des centres urbains (Berkane et Ahfir) a produit une rupture dans le tissu social, économique et spatial de la région, par la facilité des déplacements des individus.

Berkane et Ahfir constituaient les deux centres urbains créés suite à la colonisation intensive de la plaine des Triffa. Ils formaient les pôles d'emploi privilégiés par les jeunes du massif. La figure 2.44 reflète la croissance de ses populations. Cette croissance est liée à la fois à l'installation des familles émigrées et à l'explosion démographique.



(MAHLA, 1984) et Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Direction de la Statistique

Figure 2.44 : Evolution de la population de la plaine des Triffa : Berkane et Ahfir (1936/2004)

3. La période post-coloniale : montagne en crise

Pendant la période post-coloniale, la région orientale se transforme en une terre d'accueil des migrants vers une zone d'émigration européenne

Après l'indépendance du Maroc (1956) et le départ des étrangers, le marché du travail de la plaine des Triffa subit une baisse. Plus tard l'indépendance de l'Algérie (1962) marque la fin du courant migratoire saisonnier de la main d'oeuvre vers l'Algérie.

La période post coloniale présente un bouleversement radical de la structure socio-économique et territoriale de la région Nord-Est du Maroc. Ceci se manifeste par la migration de la population vers l'Europe (figure.2.41-3)

Cette phase est caractérisée par trois périodes distinctes les années 1960, 1970 et 1980 :

3.1. Les années 1960

Comme nous l'avons défini auparavant, les montagnes des Béni Snassen représentaient un gisement de main d'œuvre. La fin du marché du travail chez les colons (au Maroc et en Algérie) a produit la réorientation de la migration de la population de la région orientale et notamment la population du massif des Béni Snassen vers l'Europe, « *la région orientale est le premier foyer*

de la migration au Maroc » (GUITOUNI, 1995b). Les flux migratoires répondaient à l'appel de main-d'oeuvre des pays européens (France, Allemagne, Belgique et Pays-Bas).

Durant cette période, il s'agissait d'une migration temporaire et individuelle. L'argent gagné représentait un revenu complémentaire important et était entièrement investi dans les douars d'origine et dans l'agriculture.

En parallèle à cette migration intensive, les années 1960 constituaient une période de forte croissance démographique. Cette croissance se traduit par une extension importante des superficies cultivées et la construction des habitats. Ce phénomène a touché la montagne comme l'avant pays malgré le départ assez remarquable de la main d'oeuvre.

En montagne, les terres marginales, les plus pentues et les plus sensibles à l'érosion, celles que la période coloniale a dénudé de leur couvert végétal, ont été mises en culture pour subvenir aux besoins d'une population en pleine explosion (GAUCHE, 2003).

Les années 1960 constituent alors une période de très forte pression anthropique et de surexploitation du milieu. Les apports externes (gains des travailleurs en Europe) ont minimisé les impacts sur un milieu fragile dont les ressources naturelles existantes sont très limitées face à une telle explosion démographique.

Durant ces années, l'émigration a contribué, donc, à une certaine régulation et à un maintien temporaire de la population locale en montagne ; d'autant plus que ces années coïncident avec des années pluvieuses pendant lesquelles l'apport agricole a été important. Donc, d'une façon paradoxale, tandis que l'émigration vide ses campagnes de leurs forces vives, elle est aussi l'élément fondamental qui permet de les maintenir en vie.

La construction des barrages Mecheraa Hammadi (1957) et Mohamed V (1967) sur l'oued Moulouya a complètement bouleversé le paysage socio-économique et agraire de la région. L'extension des superficies irriguées a donné un élan à l'exode rural. Il est important de noter que jusqu'à cette période, la région Nord Est était en situation d'enclavement par rapport à l'oued Moulouya. Après les constructions de ces ouvrages hydrauliques, l'oued Moulouya présente un double tranchant vis-à-vis de la situation économique et sociale : c'est un atout pour l'extension de zones agricoles, marché du travail, contrôle des hautes eaux etc. mais aussi une contrainte : concentration de la population dans les zones dites « grandes hydrauliques » qui correspondent à la plaine de Triffa et celle de la rive gauche de la Moulouya : Zébra, Garet et Bou-Areg (cf. figure 5).

La concentration des fonctions d'éducation (écoles), de confort (eau et électricité), des services publics et administratifs et le développement des industries agro-alimentaires ont engendré une forte mobilisation en faveur des pôles économiques et une désertification des zones rurales et notamment la montagne. Ceux-ci ont déplacé les problèmes socio-économiques des zones montagneuses marginalisées vers les plaines.

3.2. Les années 1970 : une période transitoire

L'émigration en Europe, jusque-là temporaire et individuelle, devient familiale et définitive (GUITOUNI 1995b). Bien que la crise économique (1974/1975) ait conduit les pays européens à verrouiller les frontières par l'instauration des visas, les flux migratoires restent aussi importants qu'avant la crise économique. Ces flux se présentent sous deux formes : regroupement familial et émigration clandestine. Le transfert d'argent se maintient malgré les conditions politiques et économiques qui régnaient en Europe (GAUCHE, 2005).

Certains villages, notamment les plus enclavés et les plus défavorisés, commencent à perdre leur population. Ces endroits (les douars des Béni Bou Yaàla et Béni Amyr) présentent actuellement des espaces en déprise, des indices de vieillissement de la population, douars en ruines (photos 2.7) etc. sont très visibles sur le terrain.

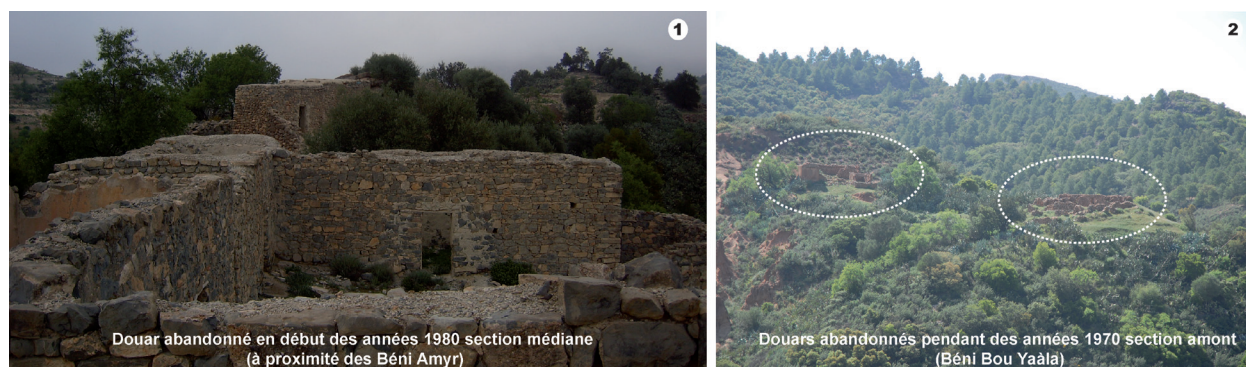


Photo 2.7 : Douars en ruines dans les sections amont et médiane du versant Nord du massif des Béné Snassen orientaux.

Les zones rurales, et notamment montagneuses, deviennent désormais des régions d'émigration. Ces zones alimentent l'émigration vers l'Europe et l'exode rural vers les villes : Oujda, Berkane, Ahfir, etc.

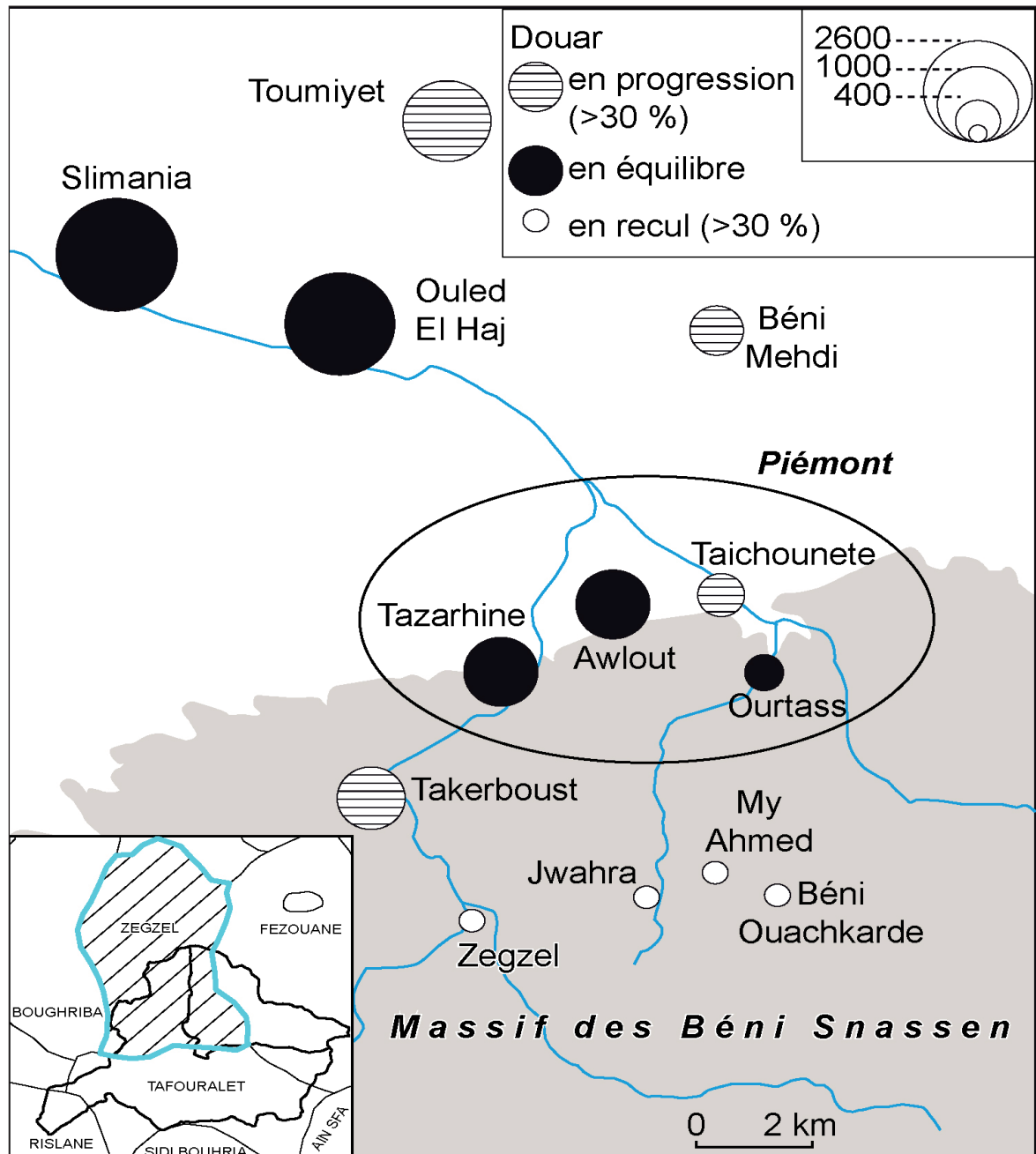
Les actions de l'Etat pour le maintien de la population en place doivent se baser alors sur des projets visant le rétablissement de l'équilibre des ressources naturelles et économiques d'un côté et les besoins de première nécessité d'un autre côté. Les seules actions, pour préserver le couvert forestier et les sols, se résument à des campagnes de reboisement sans aucune sensibilisation auprès de la population locale sur l'importance du maintien de l'équilibre de l'écosystème.

3.3 Les années 1980 : une période de crise

Pendant les années 1980, l'exode rural a été amplifié par la diminution des précipitations et le prolongement de la sécheresse. Contrairement aux années 1970, l'exode rural a touché les zones qui maintenaient jusque-là un équilibre économique : les zones appliquant l'irrigation traditionnelle, possédant des ressources en eau, et des terrains agricoles assez importants.

L'introduction d'un mode de vie de consommation occidentale a contribué, également, à la désertification des douars. Le changement a été favorisé d'abord par le transfert d'argent des travailleurs émigrés, par le contact avec les émigrés et l'ouverture sur le monde extérieur particulièrement par la télévision. Ces deux derniers facteurs ont rendu compte de l'énorme décalage entre la vie en zone marginale et le reste du monde.

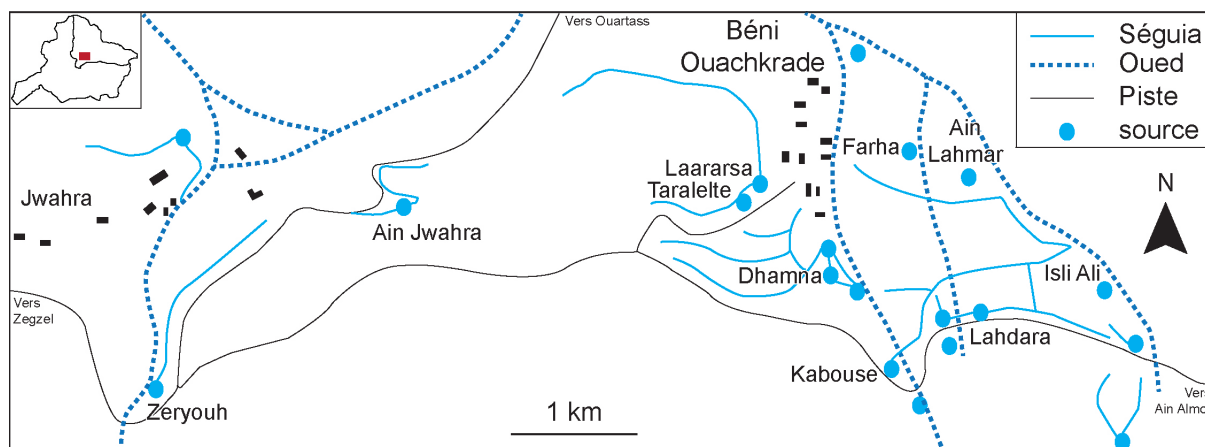
Pendant cette période, l'agriculture n'est plus suffisante pour nourrir la population à cause de la sécheresse extrêmement sévère. La population vit, en grande partie, de ressources extérieures, provenant de l'émigration en Europe et de la contrebande. Cette transformation a conduit à une crise territoriale d'une grande disparité à l'intérieur du territoire : (i) le bilan démographique global devient négatif dans les zones montagneuses; (ii) le piémont apparaît désormais comme l'espace le plus peuplé à l'échelle du massif, la population s'est particulièrement concentrée autour des centres ruraux localisés à proximité de la plaine (figure 2.45). Ceci a donné naissance à des espaces dynamiques.



(LAQUINA, 1987)

Figure 2.45 : Evolution des douars dans la commune de Zegzel (1960/1982).

Pendant les années 1980, les douars de montagne de la commune de Zegzel, ne représentaient que 14 % de la population rurale, alors que les douars du piémont et de la plaine représentaient 86 % (LAQUINA, 1987). Le douar de Takerboust présente une population importante (environ 1000 habitants). Ceci s'explique par la prospérité agricole et la proximité de la plaine. La richesse en terre agricole et la disponibilité en eau ne sont pas toujours le facteur fondamental dans le maintien de la population. L'accessibilité et la proximité de la plaine et de la ville sont les facteurs qui entrent les plus en jeu. Les douars les plus reculés et les moins reliés à la route, peuvent être touchés par l'exode rural. A titre d'exemple, les Béni Ouacherkade et Jawhra (figure 2.46) disposent de grandes richesses agricoles et hydrauliques mais l'éloignement géographique qui s'exprime par le manque d'infrastructures entretenues a favorisé le départ de la population locale.



D'après : ORMVAM

Figure 2.46 : Ressources hydrauliques dans les Béni Ouachkrades et Jwahra (1999).

A titre d'exemple, le maintien du village de Zegzel dépend essentiellement, de la présence de la ressource en eau (source de Zegzel qui assure un écoulement permanent de l'oued). Cette richesse a permis le développement d'une exploitation agricole rentable, se basant essentiellement sur les néfliers. La création d'un poste militaire français et d'un centre administratif du massif des Beni Snassen à Tafouralet (pendant la période coloniale) ont permis le développement de ce village et par conséquent le maintien de sa population.

En synthèse, on peut dire que la période post-coloniale (1960/1980) est essentiellement marquée par trois étapes primordiales :

1. **émigrations temporaires et individuelles vers l'Europe (années 1960) :** pendant cette période les flux migratoires permettaient le maintien et l'équilibre dans les zones rurales et montagneuses grâce aux revenus investis dans les douars d'origine ;
2. **émigrations permanentes et familiales vers l'Europe et exode rural (années 1970) :** cette phase d'émigration a joué un rôle important dans le changement de la mentalité des marocains. Le changement socio-économique a favorisé la première phase d'exode rural massif qui a touché en particulier les zones les plus défavorables du point de vue rentabilité agricole et les plus éloignées géographiquement ;
3. **crise territoriale : conséquence de l'émigration et de la sécheresse (années 1980) :** l'accentuation de la sécheresse par la diminution pluviométrique d'une part et le manque de main d'œuvre en zones rurales d'autre part, rendent l'agriculture et l'élevage de moins en moins rentables. Ceci a engendré un départ massif des paysans vers les villes à la recherche d'une vie meilleure. A cette période l'économie dépend totalement des ressources externes : envoi d'argent des émigrés, contrebandes (Espagne [Mélilla] et Algérie).

Pendant cette période, La mise en faillite définitive de l'équilibre traditionnel s'est manifestée sur le milieu par une dégradation importante des ressources naturelles : érosion intense sur les zones en friche, le manque d'entretien des pratiques anti-érosives, la surexploitation des ressources en eau etc.

En outre, la crise territoriale a favorisé la distinction de plusieurs territoires au sein du massif des Béni Snassen : les territoires en déprise qui touchent les zones situées en amont et qui sont pauvres en ressources naturelles (Ouled Daoud, Ouled Abdel Elkrim, Ouled Aissa Hobbane, Ouled Moussa Mhamed etc.), les territoires intermédiaires correspondant aux zones moyennement

ou relativement peu enclavées, desservies par une piste carrossable et disposant un bon terroir : olives, amandes, légumes (Labtatna, Oued Ali Ben Yassine, Lahwafi, Jwahra, Béni Ouachkrade etc.) et les territoires dynamiques composés de centres ruraux localisés en piémont à proximité des routes (Tafouralet, Zegzel, Ouartas, Tazarine).

4. Période récente 1990/2010 : montagne en mutation

La situation actuelle de la montagne des Béni Snassen est la conséquence d'une série de bouleversements qui se sont déroulés depuis la fin du XIX^{ième} siècle. Plusieurs aspects sont à prendre en considération pour appréhender l'évolution des actions anthropiques dans la montagne des Béni Snassen pendant les deux dernières décennies (1990/2010). Ces aspects sont d'ordre politiques, économiques et sociaux. L'interaction de ces facteurs a amplifié la crise territoriale, socio-économique et culturelle de la région (figure.2.41-4).

4.1. Décisions politiques

Si la région orientale rencontre des problèmes socio-économiques et territoriaux, c'est parce qu'elle est une des régions les plus éloignées du centre de gravité du pays, Rabat et Casablanca (GUITOUNI, 1995a) et elle est restée longtemps à l'écart du développement économique (GAUCHE, 2010).

Avant la pénétration coloniale, la seule ville existante était la ville d'Oujda, fondée vers 990. Celle-ci représentait le centre commercial et le siège du pouvoir. Pour le reste, il s'agissait d'un territoire rural et marginal. La création des pôles économiques, dans la plaine des Triffa (Berkane et Ahfir), a favorisé la concentration progressive de la population dans ces villes. L'hémorragie démographique importante et l'exode rural ont engendré de grands déséquilibres spatiaux. Ceci est un témoignage de la crise profonde qui a touché ces espaces.

Pour mieux gérer les problèmes posés dans cette zone, en 1993, le gouvernement marocain a mis en place un Programme National de Développement des Provinces du Nord du Maroc (LAOUINA, 1998).

Ce programme avait pour but de (i) mettre l'accent sur les causes de la crise territoriale (ii) d'évaluer ses conséquences et (iii) de proposer des solutions pour une gestion rationnelle de la région et notamment les zones montagneuses.

Les causes de ce déséquilibre ont été mentionnées dans les paragraphes précédents. Les conséquences des séries de contextes qui régnaient pendant à peu près un siècle ont conduit à une grande disparité entre deux milieux opposés : pôle d'activité (ville), et milieu en déprise (montagne).

Dès les années 1980, des problèmes socio-économiques se sont posés dans les deux milieux. Actuellement, les villes n'ont plus la capacité d'accueillir des nouveaux arrivants, les montagnes souffrent d'un manque d'équipement des services sociaux. La prolongation de la sécheresse aggrave les difficultés des pratiques agricoles et ne les rend pas rentables.

Le domaine montagneux souffre donc, à la fois d'un sous-développement et de la dégradation de son environnement en liaison avec une pression accrue sur ses ressources. La dégradation actuelle est donc le reflet d'une crise socio-économique, politique et culturelle.

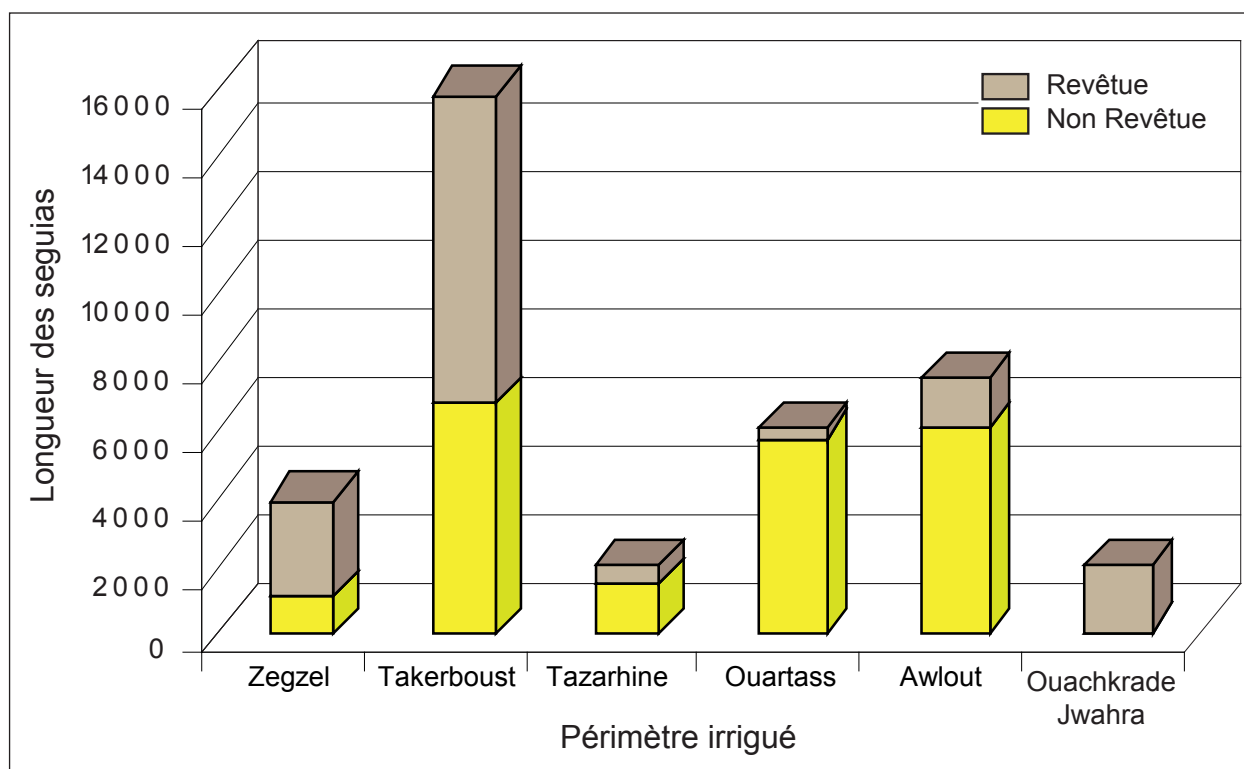
Les projets politiques à mettre en place doivent être inspirés d'une politique environnementale et territoriale. Pour pouvoir maintenir la population locale en place, empêcher l'exode rural et par conséquent le déplacement du problème socio-économique des zones montagneuses possédant des richesses mal et/ou difficilement exploitées vers des zones urbaines saturées, il est nécessaire de produire suffisamment dans les zones et les secteurs les plus riches et les plus pertinents, pour réduire la pression sur les zones fragiles.

Contrairement à la période coloniale, où les montagnards des zones les plus défavorisées, ont découvert les villes par nécessité et non pas comme un lieu privilégié de vie (l'objectif de leur départ était d'assurer le maintien et la survie de la famille en montagne), la situation actuelle est différente. En plus des départs pour la recherche de nouveaux revenus, dans certains cas, les migrants quittent la montagne non pas par nécessité mais dans le but d'y trouver une vie plus confortable ; pour un nombre important d'entre eux, c'est le désir de mieux vivre qui a dicté leur départ. Donc ils migrent par manque d'infrastructures complémentaires sur place (routes, écoles, établissements de services publics etc.).

L'amélioration des conditions de vie de populations défavorisées grâce à la mise en place d'équipement et de services sanitaires et sociaux (habitat, écoles, assainissement, santé, désenclavement routier, etc.) est nécessaire pour faire face à cette crise.

Actuellement, les pouvoirs publics s'intéressent de plus en plus à ces espaces, par le lancement de programmes touchant le monde rural tel que le programme PNAGEPR (Programme National d'Approvisionnement Groupé en Eau Potable Rurale) ; PNED (Programme National d'Electrification Décentralisé).

Jusqu'à récemment, la majorité des actions gouvernementales était axée sur la protection des ressources les plus menacées et notamment le reboisement et quelques opérations de développement global ont été tentés (entretien et création des pistes, entretien des seguias (figure 2.47). Or, il se pose en montagne avant tout un problème de réinsertion visant la redynamisation de l'économie paysanne et la constitution de ressources endogènes durables.



D'après l'ORMVAM

Figure 2.47 : longueur des seguias restaurées et non restaurées dans le périmètre de la commune de Zegzel (1999).

Les moyens pour réussir une politique en montagne, doivent se baser sur la mise en place d'un nouveau mode de valorisation des sources existantes ; en limitant la pression sur ses ressources et en appliquant une stratégie de compensation de celles-ci. C'est pourquoi il est nécessaire de mener une analyse des contraintes physiques et socio-économiques avant le choix de tout projet d'aide à la décision.

La participation de la population, la prise en compte des stratégies paysannes, l'appui sur les organisations villageoises et la mise en place de contrats et de lois définissant les responsabilités de chaque partie, constituent une réelle garantie pour une gestion convenable des ressources et la réussite d'une politique de développement en montagne.

Pour assurer l'application d'un développement durable, il est nécessaire de mener une politique à triple entrée : (i) application des actions gouvernementales pour la protection des ressources naturelles ; (ii) intégration de la population locale et sensibilisation de celle-ci sur le bienfait de ces aménagements à long terme, en démontrant la nécessité primordiale de ces travaux et (iii) enfin mise en place des systèmes de production durable « développement soutenable » (LAOUINA, 1998), dont la rentabilité économique est prouvée.

Cette politique aura pour but de maintenir la population locale en place, d'éviter le surcroît démographique qui continue à migrer vers les villes, de préserver les ressources naturelles, de garantir leur bonne gestion et de supposer une stabilité relative de l'écosystème.

4.2. Situation économique

Développement agricole

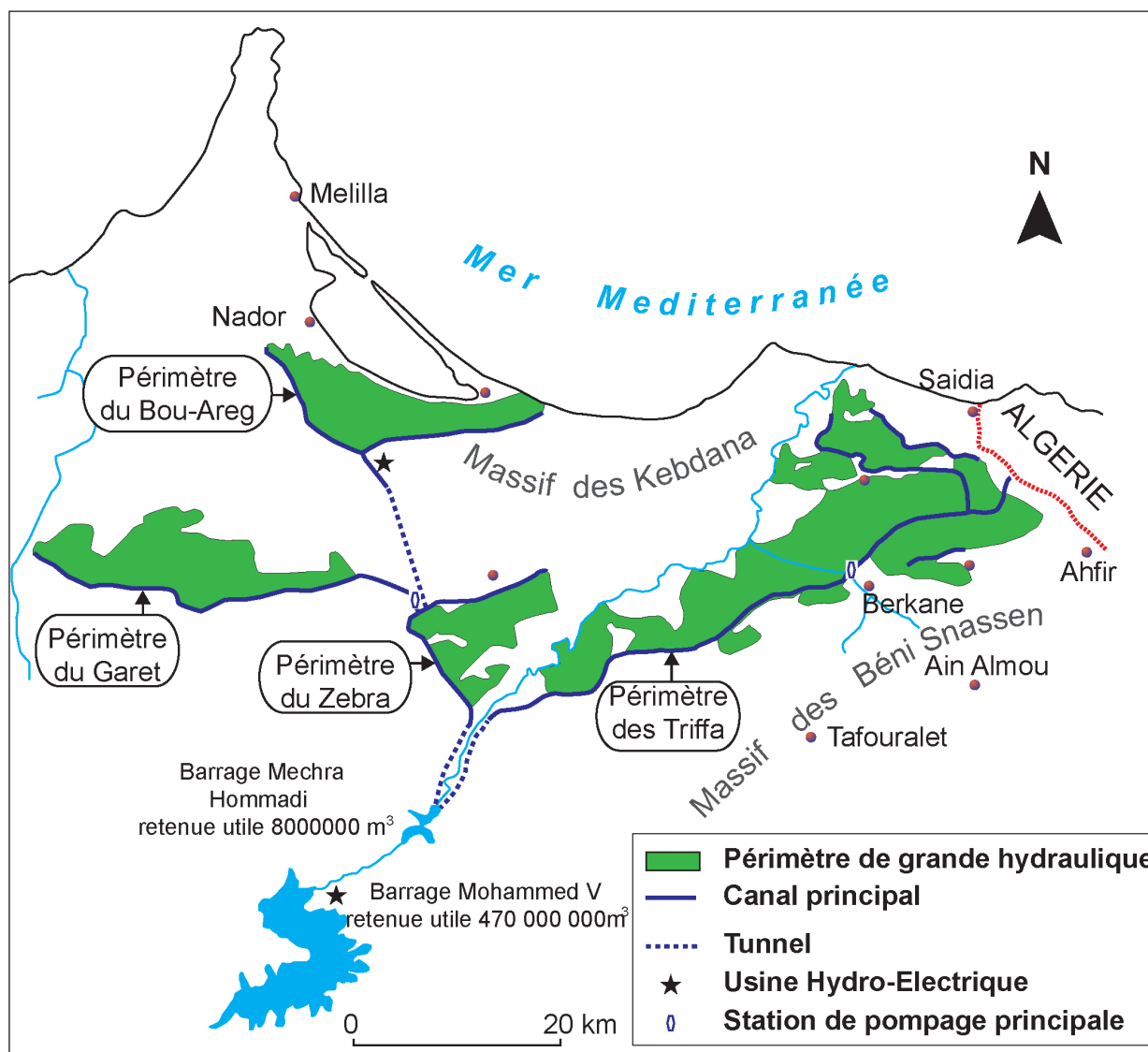
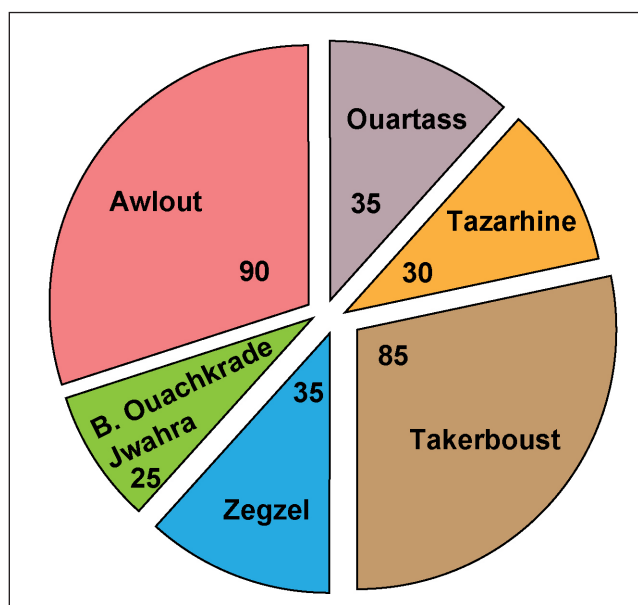
Le massif des Béni Snassen dispose d'un important périmètre d'irrigation, implanté principalement sur le versant nord de la chaîne (des Béni Snassen). Compte tenu de la nature géologique de ses formations, le massif constitue un véritable réservoir d'eau. Les sources en eau constituent le noyau de l'agriculture irriguée dans la région depuis plusieurs siècles. Ces sources sont généralement associées à des bassins d'accumulation et à des réseaux d'irrigation. Leur but est de permettre aux agriculteurs de disposer d'une réserve d'eau suffisante pour l'irrigation pendant la période de sécheresse.

Dans les limites de la zone d'étude, seule la commune de Zegzel qui contient les périmètres d'irrigation suivants (figure 2.48) : Zegzel (35 ha), Jwahra et Béni Ouachakrade (25 ha), Awlout (90 ha), Quartass (35 ha) Tazarhine (30 ha) et Takerboust (85 ha), bénéficie d'un encadrement de l'ORMVAM (Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de Moulouya). La taille, le morcellement des terres agricoles, et la faible importance des ressources en eau, dans la commune de Tafouralet n'ont pas permis l'instauration d'un encadrement technique par l'ORMVAM.

Malgré l'importance de ces périmètres sur le plan économique et social, ils suscitent peu d'intérêt de la part des pouvoirs publics. Les investissements qui y sont consentis sont faibles en comparaison de ceux des périmètres de la Grande Hydraulique (figure 2.49) (la plaine des Triffa, Zebra, Garet, Bou-Areg) qui s'étendent sur une superficie de 65 400 ha (El GHALI et al., 2004). La politique engagée a souvent négligé la mise en valeur de la ressource en eau en montagne, parce qu'il a fallu la conserver abondante et disponible pour les plaines voisines (les périmètres de la grande hydraulique) qui en manquent et qui sont susceptibles de l'utiliser à la fois plus facilement et avec plus de réussite sur le plan de la rentabilité. Ceci a fait des périmètres de montagne des zones marginalisées et des foyers favorables à un fort exode rural lors des périodes de sécheresse.

Figure 2.48 : Superficies des périmètres irrigués dans la commune de Zegzel (ha).

D'après l'ORMVAM



D'après (MATHIEU *et al.*, 1987)

Figure 2.49 : Périmètre irrigué de la basse Moulouya.

Afin de redresser la situation agricole, il est indispensable d'instaurer une nouvelle politique qui vise à redynamiser l'agriculture dans le monde montagnard. Cette démarche doit prendre en considération trois principaux axes : réaménagement des zones irriguées, accompagnement technique des agriculteurs, préservation du sol et valorisation des produits agricoles.

Réaménagement des zones irriguées

Pour la réussite du réaménagement des zones irriguées il faut prendre en compte les points suivants : les ressources en eau et le réseau d'irrigation.

Photo 2.8 : Etat actuel des bassins d'accumulation des eaux de sources et du réseau d'irrigation dans le massif des Béni Snassen orientaux.



Ressources en eau

La capacité des bassins d'accumulation des eaux des sources, connaissant un régime variable, n'est pas adaptée à leurs fonctionnements. Le débit de ces sources est très variable. Il est tributaire des conditions pluviométriques : hautes eaux pendant les périodes de pluie et basses eaux pendant les périodes de sécheresse. Les bassins d'accumulations sont de faible capacité.

Ils stockent de petites quantités d'eaux et par conséquent ne répondent pas à la forte demande en eau pendant les périodes de pénurie (photos. 2.8). Il est indispensable avant l'application de toute opération d'aménagement, visant la gestion et le stockage des ressources en eau, de bien connaître le comportement des sources, en menant des campagnes de mesures de débit. Ces données sont actuellement inexistantes ou ponctuelles et n'ont jamais fait l'objet d'une étude synthétique.

Réseau d'irrigation

Les réseaux d'irrigation (seguias) sont souvent en mauvais état (cf. photos 2.7). Le réaménagement de ces réseaux pose des problèmes de choix d'une technique adaptée aux besoins des agriculteurs et à leur capacité de gestion, surtout que parmi les structures foncières, 20 % des parcelles ont une superficie inférieure à 0,5 ha (tableau.2.6 et figure 2.50) et les droits d'eau ancestraux sont difficiles à évaluer et très complexes à gérer. Ils résultent d'une mise en place très ancienne. Hérités du système traditionnel (avant la colonisation française), ils ne sont pas toujours adaptés aux pratiques actuelles.

		0 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	2 à 5	5 à 10	>10	Total
Exploitation agricole	(ha)	72,7	47,3	47,8	64,8	23,8	113,6	370
	%	20	13	13	17,5	6	31	100
Agriculteur	Nbre	472	60	65	19	4	3	623
	%	76	10	10	3	0,5	0,5	100

D'après l'ORMVAM

Tableau 2.6 : Structure foncière de la zone « Petite et Moyenne Hydraulique» (commune de Zegzel 2003).

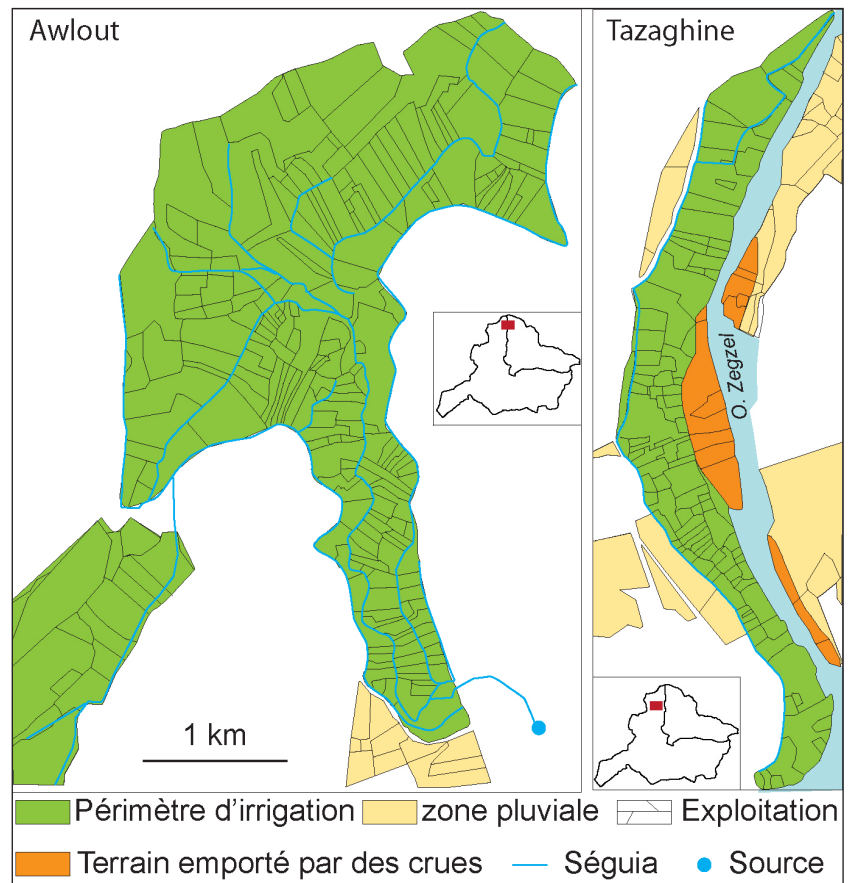
Le tableau montre que, selon les exploitations agricoles inventoriées par l'ORMVAM la structure foncière est caractérisée par la dominance de la micropropriété. 76% des agriculteurs possèdent des exploitations de moins de 0.5 ha, et seulement 0,5 % ont des exploitations supérieures à 10 ha.

Souvent, les aménagements réalisés dans ces zones ne se limitaient qu'à des modifications superficielles en se basant essentiellement sur la restauration des ouvrages existants. La politique d'aménagement à mener actuellement, doit se baser d'abord sur la communication et la concertation entre les décideurs et les agriculteurs concernés. Il faut également que les projets d'aménagement aient des objectifs à la fois immédiats, en répondant aux problèmes posés et des objectifs à long terme en aboutissant à une gestion rationnelle et durable de la ressource.

Bien que l'agriculture soit une pratique très ancienne dans cette région, un encadrement technique ciblé et adapté par les organismes professionnels s'avère nécessaire pour améliorer la rentabilité agricole et rationaliser les pratiques.

Face à la concurrence de l'agriculture industrielle pratiquée en plaine d'une part, et la sécheresse sévère de ces trente dernières années d'autre part, le maintien de l'agriculture en montagne dépend beaucoup de sa rentabilité. Les politiques à mener nécessitent un encadrement technique qui vise à valoriser les secteurs les plus riches et les plus pertinents pour assurer une production rentable et à accompagner les agriculteurs, pour adapter des méthodes efficaces dans les milieux les plus fragiles.

Figure 2.50 : Structure foncière d'Awlout et Tazaghine (1999).



D'après l'ORMVAM

Préservation des terres agricoles

En raison des conditions physiques du milieu, les terres agricoles sont menacées par l'érosion hydrique (photo 2.9). Le poids de la responsabilité humaine est fondamental dans l'accélération et la fragilisation du sol. Les pratiques passées et actuelles constituent un moteur de cette fragilisation.

Pour minimiser les dégâts des pluies violentes, il est important d'assurer l'entretien des terrasses agricoles (photo 2.9) et d'encourager la mise en place de murets anti-érosifs dans les zones accidentées à forte pente. Cette opération facilite l'infiltration et empêche le ruissellement de l'eau. Les murets limitent aussi le transport des sédiments de la couche arable.

Les parcelles les plus exposées à l'érosion sont aussi celles dans lesquelles les pratiques agricoles sont saisonnières sans aucune implantation arboricole. Le développement d'une plantation fruitière DRS (défense et restauration des sols) empêche l'érosion du sol (ORMVAM, 1998).

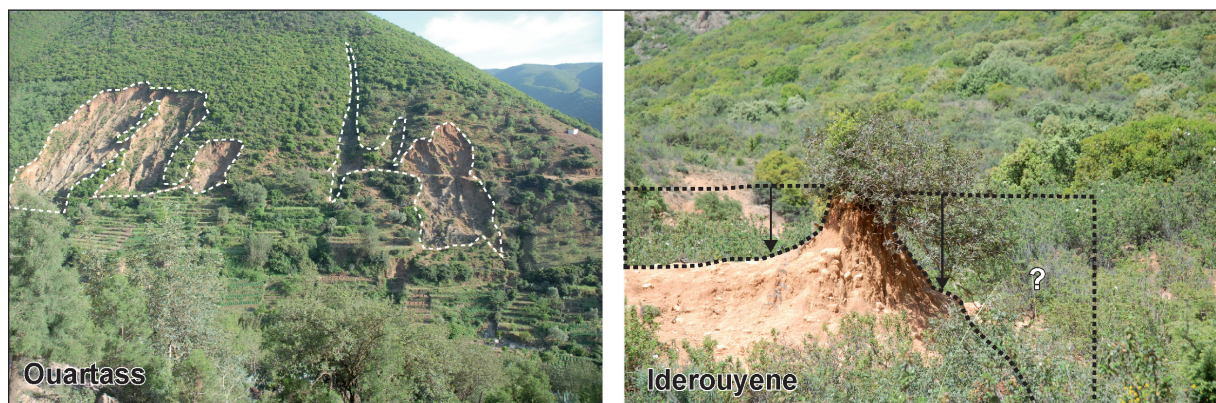
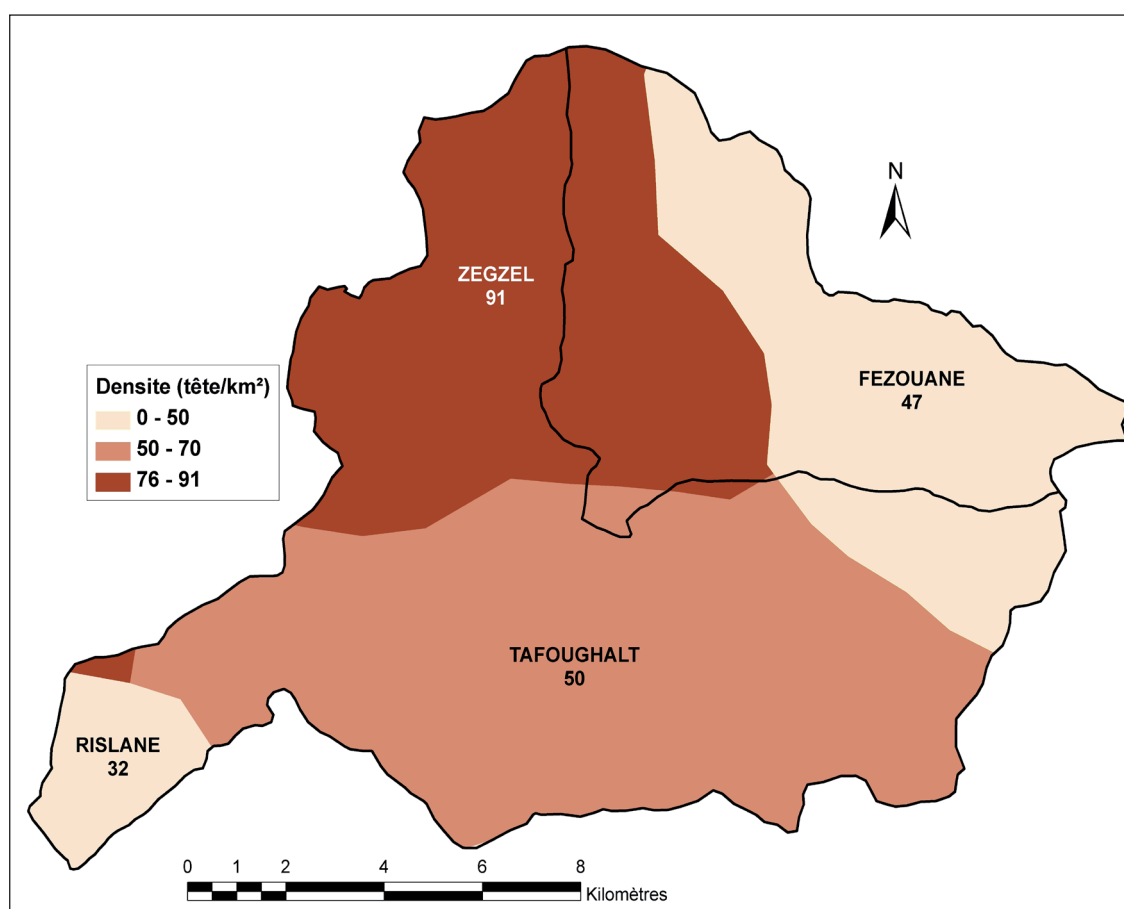


Photo 2.9 : Exemples de l'érosion du sol dans les Béni Snassen orientaux (2009).

Pâturage

L'élevage est une activité complémentaire dans le massif des Béni Snassen. Les troupeaux sont essentiellement constitués d'ovins et de caprins. La forêt est la principale source d'alimentation (cf. partie végétation). Malgré la faible densité du cheptel (91 têtes/km² pour la commune de Zegzel, 50 têtes/km² pour Tafouhale, 47 têtes/km² pour Fezouane et 32 têtes/km² pour Rislane). A l'échelle de la division administrative des communes, les zones forestières sont sur-pâturées et fragilisées. Dans certains cas, les limites communales ne sont pas respectées et notamment pendant les périodes de sécheresse, pendant lesquelles la végétation devient de plus en plus rare (figure 2.51). La topographie du massif des Béni Snassen (1 500 m de dénivelé) favorise le déplacement des troupeaux sans l'existence d'une transhumance saisonnière. Les réelles limites de déplacement des troupeaux sont les obstacles naturels (escarpement, crêt, absence de couvert végétal, etc.)



Source: Direction Provinciale de l'Agriculture (Oujda)

Figure 2.51 : Densité communale du cheptel (1995).

Projets touristiques

Le massif des Béni Snassen attire de plus en plus de touristes de grandes villes de la région orientale : Oujda, Berkane, Nador etc. (tableau 2.7).

Tableau 2.7 : Pourcentage de provenance de touristes (printemps 2002).

(KHATTABI 2003)

	Provenance	Pourcentage
Région orientale	Oujda	45
	Berkane	33,2
	Nador	14,2
	El Ayoune	4
	Zayou	1,2
	Figuig	1,2
	Reste du Maroc	1,2

Les touristes sont attirés par les paysage exceptionnels du massif par rapport à l'environnement dans lequel il se trouvent : couvert forestier important, climat relativement doux, relief, structure géologique et formes karstiques présentant une grande curiosité por les visiteurs (grotte du Chameau, gorges, panoramas), site d'intérêt préhistorique (grotte des Pigeons), etc. (photo 2.10).



Photo 2.10 : Visites touristiques des deux sites les plus fréquentés dans le massif des Béni Snassen (grotte du Chameau et grotte des Pigeons) mai 2009.

Les pratiques touristiques ne sont pas mises en valeur ni contrôlées. Aucun dispositif n'est mis en place à l'exception de quelques panneaux implantés dans les sites les plus fréquentés (photo. 2.11). Ils sensibilisent les visiteurs à la fragilité du milieu et les incitent à respecter la nature.

L'absence d'une politique efficace pour mener un écotourisme engendre des conséquences négatives sur le milieu : incendie à proximité de la grotte des Pigeons déclenché (jbel Qabbouz) par un touriste en 2006, déchets solides visibles à proximité des sites remarquables, dégradation des spéléothèmes, coupes de bois etc. Certains touristes ne sont pas conscients de leurs actes. 6% des visiteurs jugent que seuls les décideurs doivent s'occuper des problèmes environnementaux et ne se sentent pas concernés par la préservation du milieu naturel (KHATTABI, 2003).



Maître d'œuvre : 1 et 4: HCEFLCD 2 et 3 ministère de la culture

Photo 2.11 : Panneaux de sensibilisation et d'indications destinés aux touristes.

Le massif englobe deux sites classés depuis la moitié du XX^{ème} siècle : la grotte des Pigeons qui se trouve à proximité du village de Tafouralet. Elle a été classée par l'arrêt visiriel du 28 octobre 1952, et la grotte du Chameau qui se trouve au niveau du douar Zegzel. Elle a été classée par l'arrêt du Directeur de l'Instruction Publique, le 18 mai 1953. Dans cette dernière, la construction des bâtiments est autorisée à condition quelle soit faite dans un style conforme à celui des constructions existantes. Le classement est mis en place dans la mesure où le premier site a un intérêt historique, tandis que le deuxième site présente un intérêt géologique et spéléologique. Ces deux grottes sont actuellement fermées aux publics.

La grotte du chameau a été aménagée par le Ministère du Tourisme pendant la période 1988/1991. Son ouverture pour une exploitation touristique a été conditionnée par un certain nombre d'aménagements et de mesures à prendre en considération. Parmi ces mesures, il faut

confier les travaux d'aménagements extérieurs des sites d'accueil à un gestionnaire spécialisé pour assurer une gestion adaptée au site. Il faut également que le HCEFLCD (Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification) autorise une occupation du sol par le futur gestionnaire du site.

En 2000, un projet de convention a été élaboré par le Département du Tourisme. Il a proposé l'approbation aux autres partenaires qui interviennent dans le site : la commune de Zegzel, HCEFLCD, et le Ministère de la culture. Ce projet n'a pas pu voir le jour. Vingt ans après l'aménagement de la grotte du Chameau, elle demeure, donc, toujours fermée au public.

Bien que les deux grottes restent fermées au public et manquent d'un dispositif touristique adapté, beaucoup de visiteurs se rendent dans le massif des Béni Snassen (environ 1 350 personnes par jour pendant la période de pic (KHATTABI, 2003). 77% des visites sont effectuées au printemps. Les visites sont concentrées sur les week-end : 45% le dimanche, 25% pour les samedi, 4% les autres jours et 4% les jours fériés (KHATTABI, 2003). Les sites visités sont les vallées de Zegzel et Tafouralet. La principale pratique est la randonnée et le pique nique.

4.3 Analyse démographique

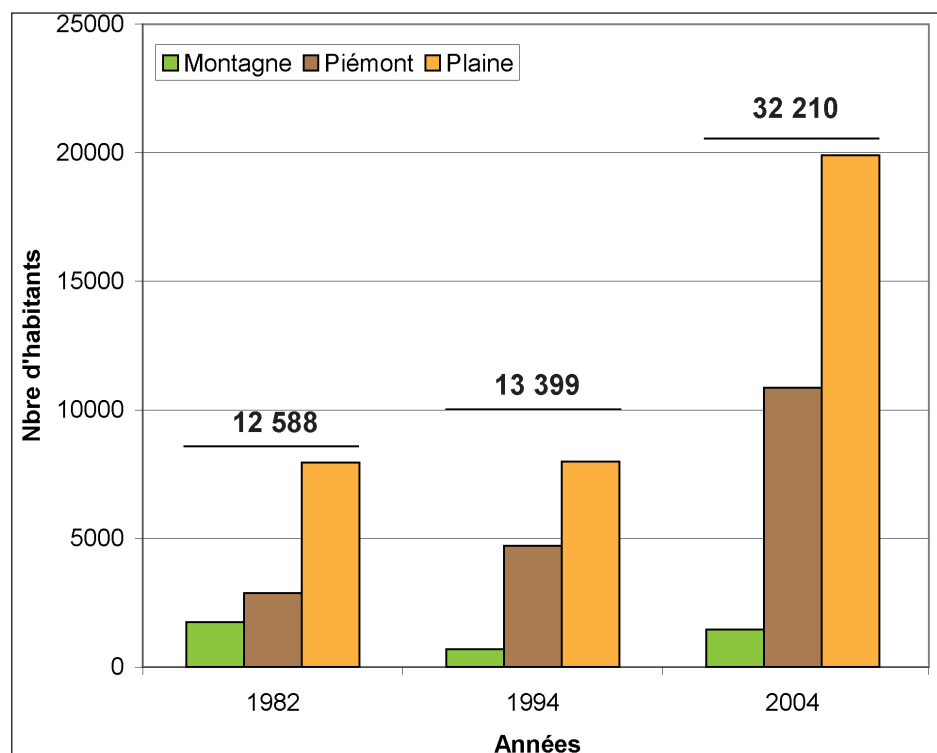
Pour démontrer la répartition géographique et la relation montagne/ plaine nous prenons la commune de Zegzel comme étude de cas. Le choix de cette commune nous paraît pertinent, dans la mesure où cette commune couvre trois espaces bien distincts : montagne en déprise, piémont et plaine en évolution dynamique grâce à leur positionnement géographique en proximité de Berkane et des périmètres irrigués. Ce cas d'étude, illustre l'influence de la différenciation physique et économique nette entre la montagne et la plaine.

Situation dans la commune de Zegzel

Pour appréhender l'évolution et la dynamique démographique dans cette zone, nous nous basons sur une longue période d'observation (1982/2004).

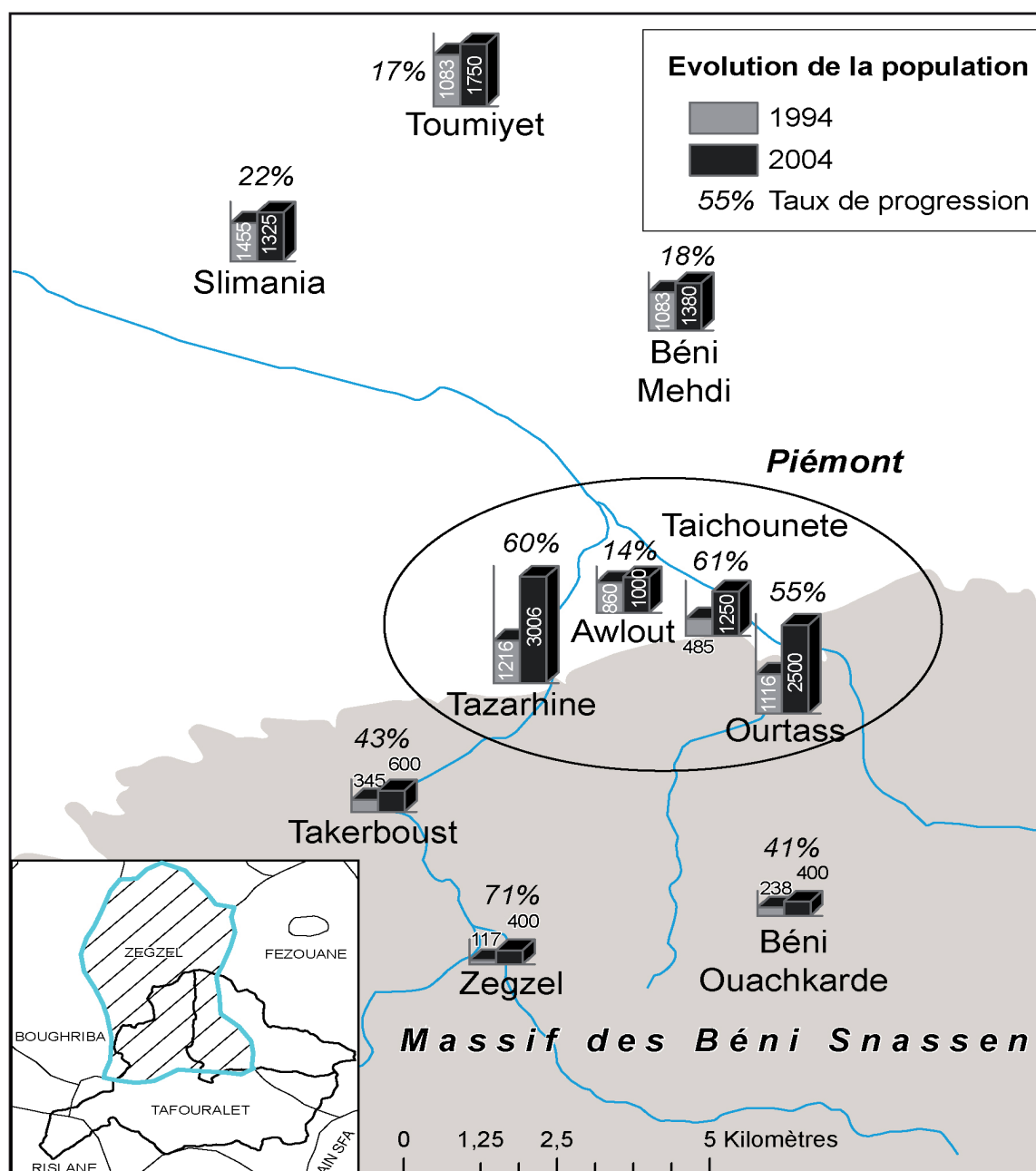
L'évolution démographique durant cette période révèle la dynamique spatio-temporelle de l'évolution démographique en montagne, piémont et en plaine (figure 2.52).

Figure 2.52 : Evolution démographique de la commune de Zegzel (1982/2004).



D'après : (MAHLA, 1984) et Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Direction de la Statistique

Pendant les années 1982, la population en montagne présentait 1 756 habitants sur 12 588 de population totale de la commune de Zegzel, 2 877 en piémont et 7 955 en plaine. Ensuite, la montagne s'est vidée progressivement de sa population pour atteindre 700 habitants en 1994 sur 13 399 de la population totale de la commune. Cette baisse est due essentiellement à l'exode rural qui a marqué les années 1980. Le moteur essentiel du départ des montagnards pendant cette époque était la sécheresse extrêmement sévère qui a touché la région. En contre partie, le piémont a attiré plus de population pour atteindre 4 716 habitants. En 2004, la population de la commune de Zegzel s'est multipliée fois trois pour atteindre 32 210 habitants. La répartition géographique de la population est spatialement variable : 1 455 habitants dans la zone montagneuse, 10 856 en piémont et 19 899 en plaine. Pendant cette période, la population qui occupe la plaine est de provenance différente (les Béni Snassen, les hauts plateaux, etc).



Source : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Direction de la Statistique

Figure 2.53 : Répartition spatiale de la population de la commune de Zegzel (1994/2004).

La cartographie spatiale de l'évolution démographique des principaux douars de la commune de Zegzel pendant la période d'observation (1994/2004) rend compte de l'explosion démographique du piémont et de la plaine (figure 2.53).

En 1994, Les douars de piémont et de la plaine dépassaient 1000 habitants par douars à l'exception de Taichounete (485 hab.) et Alwout (860 hab.). En 2004, les douars de piémont ont enregistré une explosion sans précédent pour atteindre 1250 hab. à Taichounete soit une progression de 61 % en 10 ans et 1000 hab. à Awlout. Tazarhine et Ourtass ont enregistré une progression de 60 % et 55 % respectivement.

Les douars de montagne ont enregistré des taux de progression importants : 71 % pour Zegzel, 43 % pour Takerboust et 41 % à Béni Ouachkrade. Cette augmentation est liée en partie au retour des retraités émigrés en France et qui ont introduit un nouveau mode de construction de maison en montagne (photo 2.12).

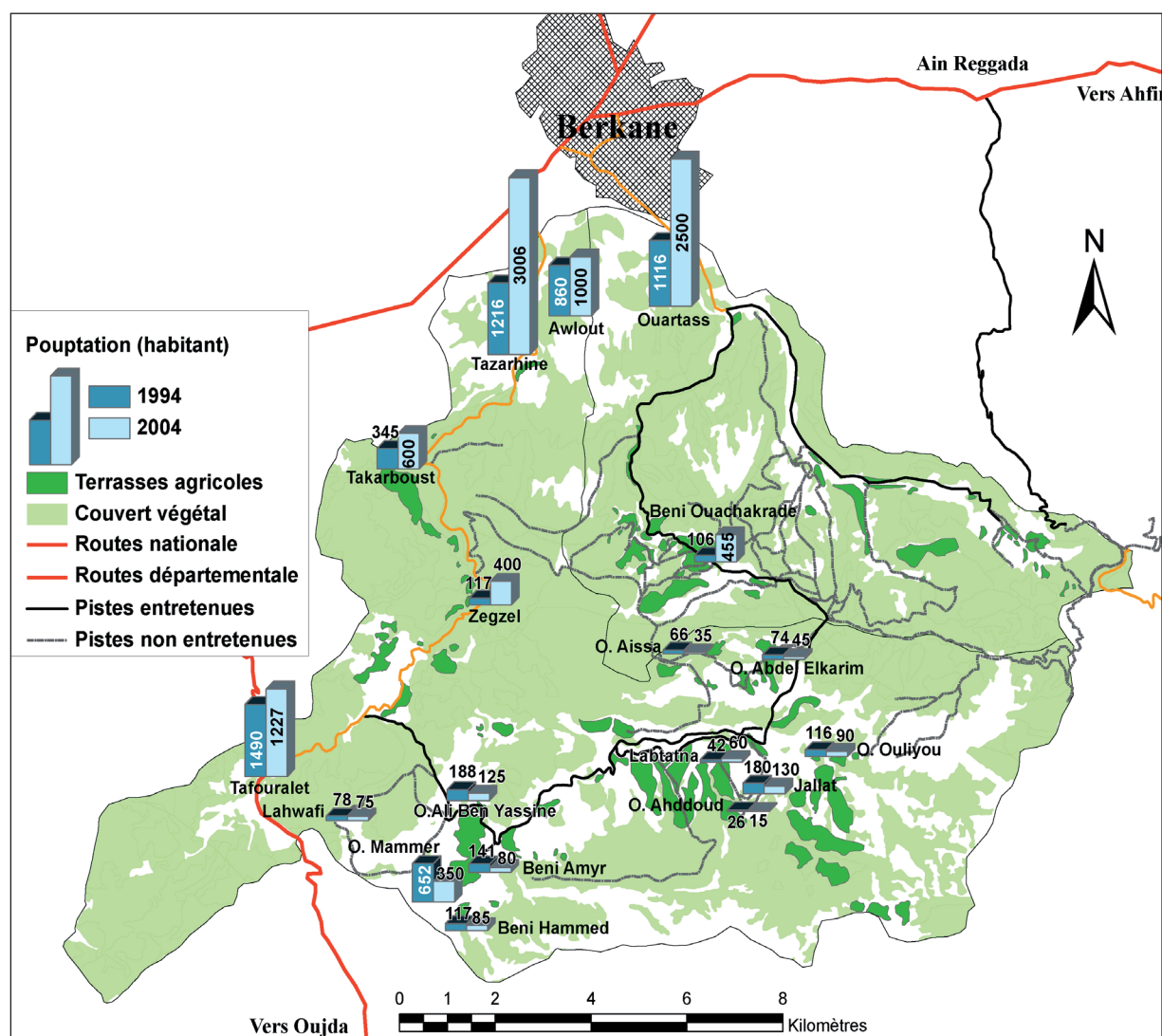


Photo 2.12 : Introduction de constructions modernes dans le massif des Béni Snassen

Situation en montagne

Pour mettre en évidence la situation en montagne, l'étude se base sur les deux derniers recensements (1994/2004). La figure 2.54, montre que les douars situés en piémont et sur les routes ont connu une évolution positive (Ouartass, Awlout, Tazaghine, Takerboust, Zegzel et Tafouralet), tandis que les douars isolés ont connu une évolution négative (O. Ali Ben Yassine, O. Mammer, Béni Amyr O. Ouliyou etc.). Seul Béni Ouachakrade a connu une évolution positive.

La répartition démographique, dans le massif des Béni Snassen, dépend de l'interaction de plusieurs facteurs : la disponibilité des ressources naturelles (terres agricoles, eau et forêt) des équipements pour améliorer la rentabilité de ces ressources naturelles (seguias, accompagnement technique de l'ORMVAM etc.) et les infrastructures (les routes et les pistes). Les services administratifs (écoles, hôpitaux etc.) influencent également le déplacement et la répartition de la population.



Sources : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Direction de la Statistique

Figure 2.54 : répartition de la population dans les bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane (1994/2004).

Conclusion

L'étude menée sur les actions anthropiques et la dégradation du milieu a pour objet de préciser la responsabilité de l'homme dans les processus de fragilisation du milieu. Cette approche se base sur quatre périodes clé pendant lesquelles le sous système « Homme » a subi des modifications majeures : (i) période précoloniale (sédentarisation de la montagne qui présentait un espace fermé, (ii) période coloniale (rupture de système traditionnel à cause de la réorganisation de l'espace par l'intervention des colons français), (iii) période postcoloniale (surexploitation et dégradation des ressources naturelles) et (iv) période actuelle (existence de deux situations contradictoires : conscience de la dégradation des ressources naturelles vs enjeux majeurs de développement économique et territorial).

L'étude diachronique de quatre périodes différentes a permis de tirer les conclusions suivantes :

- la majorité des ouvrages sont hérités de la période précoloniale et nécessitent un réaménagement urgent pour assurer un bon fonctionnement des activités économiques ;

- la disparité spatiale de la population causé par l'interaction de plusieurs facteurs (historiques et actuels) : déplacement du centre d'activité économique de la montagne vers la plaine, sécheresse, marginalisation, pauvreté etc. aggravent la marginalisation de la montagne ;
- la nécessité de l'application d'une politique de « développement soutenable » pour la préservation des ressources les plus menacées, en intégrant la population locale dans la prise de décision d'une part, et en visant une rentabilité à long terme et une redynamisation de l'économie en montagne d'autre part ;
- l'apparition de nouvelles activités en montagne, notamment touristiques, reste à valoriser et à gérer, pour relancer l'activité économique d'une part et préserver les ressources naturelles déjà fragiles d'autre part ;
- l'interaction des paramètres composant le sous-système anthropique et leur évolution spatiale et temporelle ont une influence sur le système de vulnérabilité des ressources en eau karstiques. Elles favorisent soit la fragilisation du système par la dégradation et la surexploitation des ressources naturelles (défrichement, coupe de bois, incendie, activités agro-pastorales non adaptée etc.) soit au contraire favorisent sa protection par le renforcement du système (terrasses agricoles, reboisement, restauration etc.). L'évaluation de ce sous système va être présenté dans la deuxième partie.

CONCLUSION PARTIE I

L'objectif principal de cette partie, était de poser les paramètres intervenant dans **le système « vulnérabilité des eaux karstiques »**. Ce travail est basé sur une profonde réflexion qui porte sur le choix du bon outil pour apprécier la vulnérabilité des eaux karstiques. L'approche systémique est choisie, grâce à son apport d'un regard global et interdisciplinaire sur la question. Avant la mise en évidence des interactions entre les composants du système (environnementaux et anthropiques) et leur évolution spatiale et temporelle, cette partie propose une approche analytique du système. Les paramètres contrôlant la vulnérabilité des eaux karstiques se divisent en deux grands types :

Les « paramètres d'état du système » ne changent pas à l'échelle de cette étude. Ces paramètres sont la géologie, la géomorphologie et le réseau hydrographique. L'hydrochimie est abordée ici, afin de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux et de mettre l'accent sur le contrôle de la lithologie dans la répartition des ressources en eaux souterraines.

Les « paramètres variables du système » englobent les sous systèmes suivants : les précipitations, le sol, la végétation, et les activités anthropiques. Ces paramètres se caractérisent par une évolution dans le temps : le rythme de transformation et d'évolution est propre à chaque paramètre. Le changement temporel est lié à la fois aux particularités physiques et anthropiques du milieu. L'évolution temporelle des paramètres variables contrôle donc l'évolution spatio-temporelle de chaque composant.

Cette première partie a donc pour but d'identifier, de définir et de présenter les paramètres contrôlant la vulnérabilité des eaux karstiques (paramètres d'état et paramètres variables) de manière indépendante et détaillée. Cette démarche est nécessaire avant de passer à l'étape suivante qui consiste à évaluer chaque paramètre en fonction de son influence sur l'atténuation ou l'amplification de la vulnérabilité.

Après avoir posé les facteurs intervenant dans la vulnérabilité des aquifères karstiques, la partie suivante aura pour objet de mettre l'accent sur l'interaction des paramètres (fixes et variables). Pour la réalisation de cette démarche, le **Système d'Information Géographique** sera utilisé pour spatialiser, traiter, superposer et croiser les données et pour obtenir, *in fine*, différentes cartes de vulnérabilité des eaux karstiques.

PARTIE II

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES.

INTRODUCTION PARTIE II

L'objectif de la présente partie est de proposer une analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques. Cette approche est abordée à partir de différentes méthodes :

- **méthode multicritère « PPILK »** qui a pour but d'évaluer la répartition spatiale de la vulnérabilité des aquifères karstiques ;
- **approche diachronique** qui vise l'évaluation temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques ;
- pour mener à bien ces recherches, une **entrée interdisciplinaire** est indispensable. Cette étude nécessite la combinaison des sciences de la nature (géologie, pédologie, hydrogéologie, hydrochimie, etc.) d'un côté, et des disciplines des sciences de l'homme et de la société (géographie, histoire, économie, etc.) de l'autre.

Un découpage en quatre chapitres est le guide de l'évaluation spatio-temporelle de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride.

Le chapitre 3 a pour ambition de **construire du SIG**, afin de pouvoir spatialiser et évaluer les paramètres intervenant dans la vulnérabilité des ressources en eau karstiques. Ce chapitre consiste, donc, à définir les cinq paramètres contrôlant l'infiltration et l'écoulement souterrain (**Précipitation**, couverture **Protectrice**, **Infiltration**, **Lithologie**, **Karstification**) ; à spatialiser chacune des couches d'information (on se basant sur des données de sources différentes : travaux universitaires, cartes, photos aériennes, images satellites, terrain, etc.) ; à croiser les sous critères composant de chaque paramètres.

Le chapitre 4 a pour objet de croiser, superposer et pondérer les cartes obtenues de chacun des paramètres contrôlant la vulnérabilité des eaux karstiques (paramètres spatialisés dans le chapitre quatre). Des testes de différentes combinaisons en fonction des poids attribués à chaque paramètre ont été mise en place. L'objectif de cette démarche est de présenter la répartition spatiale de différentes combinaisons des cinq paramètres (PPILK), de discuter les facteurs contrôlant la distribution spatiale de la vulnérabilité et de mettre l'accent sur les conditions de la localisation et l'extension de chaque aire de vulnérabilité.

Le chapitre 5 tente a montré l'apport de la cartographie morphogénique souterraine dans la reconstitution paléo-environnementale à travers l'étude de cas de la grotte du Chameau. Cet outil cartographique permet d'étudier la répartition spatiale des formes et des dépôts endokarstiques ainsi que leurs succession chronologiques. L'interprétation des relevés cartographique clé conduit à l'identification de la reconstitution de la grotte du Chameau à l'échelle du Quaternaire.

Le chapitre 6 a pour but de mettre l'accent sur l'évolution temporelle de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques. Pour mener à bien cette étude, l'évaluation de la vulnérabilité se focalise sur les paramètres variable à l'échelle du temps de l'analyse : précipitations, couverture bio-pédologique et activité anthropique. Pour apprécier cette variation une approche diachronique a été menée en se basant sur trois périodes clé pendant lesquelles les paramètres variables du système ont subi un changement profond (les années 1940, 1970 et 2000).

Cette partie est donc une véritable étude à double entrée, d'un côté, elle permet d'appréhender la répartition spatiale des aires de vulnérabilité, et de l'autre côté elle propose une analyse temporelle de l'évolution de celle-ci. Une telle approche permet de localiser les zones les plus fragiles ainsi que leurs évolution dans le temps.

Le point phare de cette analyse, ce qu'elle permet de livrer un support d'aide à la décision en matière de gestion des ressources naturelles et des territoires.

CHAPITRE 3

CONSTRUCTION DU SIG : SPATIALISATION ET ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT DANS LA VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES.

Les aquifères karstiques constituent l'essentiel des ressources en eaux souterraines dans certains pays, notamment sur le pourtour méditerranéen. Les zones montagneuses dans lesquelles les pratiques agricoles sont traditionnelles et les exploitations industrielles absentes ne présentent pas de problèmes majeurs de la qualité des eaux karstiques. Ceci est le cas du massif des Béné Snassen (Maroc oriental) (cf. partie hydrochimie).

Dans le cadre de ce travail, la définition de la vulnérabilité des eaux karstiques s'exprime par le risque de la dégradation des eaux et par **(i) une contamination de la ressource à un niveau inacceptable de la turbidité lors des averses violentes ou (ii) un « stress » hydrique des sources pendant les périodes de sécheresse prolongée.** Donc, contrairement aux nombreuses méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique, qui se focalisent sur la qualité des eaux souterraines pour en déterminer l'origine de leur contamination, le présent travail, s'intéresse plus particulièrement à la dynamique de la vulnérabilité associée aux paramètres de surface contrôlant l'infiltration et l'écoulement souterrain. Le problème de la vulnérabilité de surface se base sur un double objectif : repérer les zones d'alimentation du système karstique (les entrées) et identifier les paramètres qui, directement ou indirectement, influencent les modalités de l'infiltration. Ces paramètres contrôlent la fragilité, ou au contraire, renforcent la protection du système karstique et par conséquent la ressource en eau. Cette démarche d'identification des éléments contrôlant l'infiltration, s'impose avant toute prise de décision concernant la protection des ressources en eau en milieu karstique. Pour appréhender la vulnérabilité à l'infiltration d'un système karstique, une bonne connaissance des points d'« entrées » (précipitations, formes karstiques) du système et des modes d'infiltration est nécessaire. Ces points et leurs interactions avec les paramètres contrôlant l'infiltration (géologie, sol, végétation et pente) conditionnent les modalités de l'infiltration et donc la recharge et le fonctionnement des aquifères karstiques (cf. approche systémique de vulnérabilité des eaux karstiques, cf. figure 9).

Afin d'atteindre ces objectifs, nous proposons une nouvelle méthode d'évaluation « PPILK ». Cette méthode a pour but d'évaluer quantitativement le problème de l'infiltration de surface. Elle comprend les cinq couches suivantes : **P**récipitations, couverture **P**rotectrice, **I**nfiltration, **L**ithologie et **K**arstification (cf. figure 10).

L'application de cette méthode comprend les étapes suivantes (TAYEBI *et al.*, 2010) :

- la spatialisation des paramètres contrôlant l'infiltration (précipitations, géomorphologie, géologie, pente, sol, et végétation). Concernant ces trois derniers paramètres, il importe de prendre en compte les pratiques anthropiques qui peuvent dégrader (activités agropastorales de montagne) ou renforcer (terrasses agricoles) le caractère régulateur du milieu ;
- l'estimation du degré de perméabilité des horizons superficiels (protection naturelle) en attribuant des notes à chacun des paramètres utilisés ;
- le croisement et la superposition des paramètres présents dès l'impluvium.

Ce chapitre abordera donc la spatialisation, l'évaluation et le croisement des cinq paramètres contrôlant l'infiltration et l'écoulement souterrain (**P**récipitation, couverture **P**rotectrice, **I**nfiltration, **L**ithologie, **K**arstification). L'évaluation des paramètres est appliquée pour chacun d'eux et des sous critères (quantité des précipitations, intensité pluviométrique, perméabilité du sol, épaisseur du sol, formes exo-karstiques, pente, occupation du sol, lithologie, et formes endo-karstiques). Chaque couche d'information sera classée en 4 à 5 classes (indice de 0 à 4, du moins au plus vulnérable).

La capacité d'atténuation de la vulnérabilité du réseau karstique est favorisée par (i) l'alimentation et la recharge des aquifères karstiques par les précipitations ; (ii) le pouvoir filtrant des couches de surfaces (sol, végétation) mais aussi par (iii) les formes exo-karstiques et l'organisation du karst

interne qui jouent sur le temps de transfert des écoulements et donc la possibilité de dépôt de la matière en suspension et l'existence d'un important stock qui assure l'alimentation permanente des sources (SALOMON, 2001) ; (iv) la nature des formations géologiques et les activités anthropiques sont des paramètres qui peuvent intervenir dans l'atténuation ou au contraire l'amplification des aléas.

L'évaluation des paramètres contrôlant l'infiltration et l'écoulement souterrain est basée sur l'estimation de leurs degrés de protection naturelle et la capacité de résilience du système. La spatialisation des couches d'informations, à l'échelle de deux bassins versants, est indispensable pour mieux apprécier la disparité dans les modalités spatiales de la vulnérabilité. La spatialisation rend compte de l'hétérogénéité de l'impluvium en fonction du croisement de degré de vulnérabilité de chaque paramètre.

Dans le cadre de ce travail de recherche, un Système d'Information Géographique est élaboré pour l'évaluation, la superposition, le croisement et la pondération des critères et sous critères contrôlant la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques.

1. Construction d'un Système d'Information Géographique

Dans le cadre de ce travail de recherche, un Système d'Information Géographique (SIG) a été élaboré. Les informations spatiales et/ou temporelles stockées portent sur les aspects suivants : la géologie, l'hydrologie, le climat, la pédologie, la végétation, la qualité des eaux souterraines, les données socio-économiques. L'ensemble de ces données a permis de constituer une base de données géo-référencée, permettant une recherche rapide et précise de l'information sur le terrain investi. Des documents cartographiques ont été réalisés, en vue d'une meilleure identification de la protection et la gestion de la ressource en eau souterraine et les facteurs intervenant dans sa vulnérabilité.

Les logiciels de SIG sont relativement nombreux (ArcGis, MapInfo, Idrisi, Synergis, etc.). Le logiciel ArcGis a été choisi en raison de sa relative puissance dans le croisement et la gestion des bases de données volumineuses.

1.1. Pourquoi un SIG ?

Un SIG est, par définition, un outil d'analyse du territoire et d'aide à la décision. L'intérêt majeur de celui-ci est sa capacité à superposer rapidement des informations géolocalisées¹ afin d'en produire de nouvelles. Cette faculté engendre une économie de temps considérable et augmente la maniabilité et l'interactivité des données localisées géographiquement (DIDON, 1990).

Le système d'information géographique (SIG) s'est imposé dans notre approche comme un outil indispensable dans la production de nouvelles informations. L'utilité du SIG dans le cadre de la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine a été discutée par VASSILOS *et al.*, (1996), SAKHO (1998), SINAN (2000).

De manière générale le SIG est considéré comme un outil d'aide à la décision qui permet de réaliser les étapes suivantes (figure 3.1) :

- **acquisition** des données : traitement des fichiers et saisie numérique. Ces données sont variées et différentes : données géométriques, descriptives, graphiques, etc. ;
- **archivage, stockage et gestion** de façon durable des bases de données géographiques volumineuses. Cette étape favorise également la **numérisation** par le remplacement des

1. objet ou phénomène localisé dans l'espace en coordonnées X,Y,Z à un moment donné.

cartes « en format papier », difficiles à manipuler par des cartes « numérisés » ;

- **analyse, manipulation et interrogation** des bases de données par le biais de requêtes qualitatives et quantitatives ;
- **affichage, mise en forme et visualisation** des cartes adaptées aux problématiques posées. L'obtention des cartes s'effectue avec la possibilité de **superposer, ajouter, extraire, échanger** et **transformer** les données dans une logique pluridisciplinaire ;
- **actualisation et mise à jour** de l'information durant la construction du SIG.

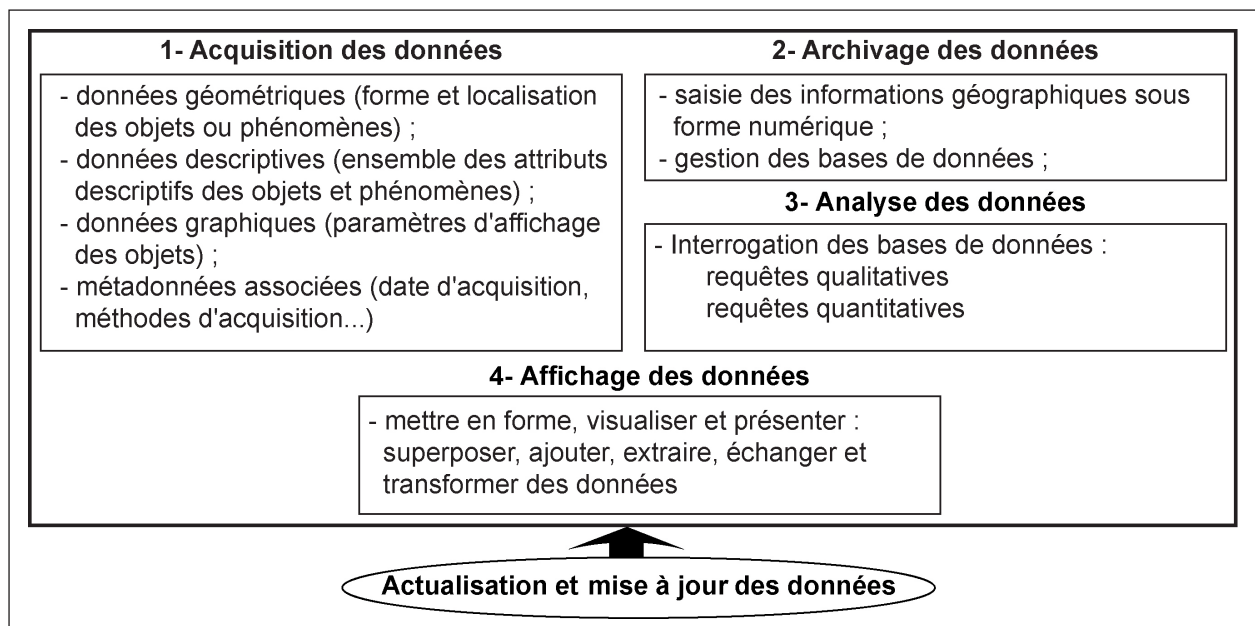


Figure 3.1 : Etapes de la construction du SIG

1.2. Composantes du SIG dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines

Le Système d'Information Géographique est bâti sur la base de données géographiques (BDG), composée de deux éléments (COLLET, 1992) :

- base de données regroupant les objets spatiaux (cartes) ;
- base de données alphanumériques (attributs) définissent les caractéristiques thématiques (coefficient de perméabilité de sol, qualité des eaux, précipitation, etc.).

La base de données de l'ensembles de systèmes informatiques est composée de cinq sous systèmes qui sont en interaction. Chaque sous système a une fonction précise au sein du SIG (DIDON, 1990) :

- **le système de saisie numérique** regroupe deux type d'informations **(i) les documents à caractère spatial** (telles que les cartes topographiques, géologiques, pédologiques, géomorphologiques, de la végétation, etc.). Toutes les cartes exploitées existant en format papier, la première démarche indispensable a été la digitalisation de toutes ces couches d'information ; **(ii) l'information analogique à convertir en une information numérique**, les bases de données alphanumériques (attributs) ont été soit directement saisies dans de

nouvelles tables du SIG ou importées à partir d'autres logiciels (exemple Excel) ;

- **système de traitement d'images** : des *images satellitaires* (Landsat qui date du 24/04/2002 et Spot qui date 05/06/2001) ont été scannées et calées, puis les informations visées ont été digitalisées. Nous disposons également de séries incomplètes de *photographies aériennes* (missions ORMVAM juin 1986 et octobre 1991) de la zone d'étude. Elles ont été exploitées pour la localisation des formes géomorphologiques et la cartographie des terrasses agricoles. Cette dernière tâche a nécessité de faire appel à d'autres logiciels (Google Earth et GEPATH 1.1.4) afin de faire face aux manques de données (cf. annexe 3) ;
- **système de gestion de base de données** : le SIG contient à la fois **(i)** un Système de Gestion de Base de Données, c'est-à-dire une gestion des données thématiques et **(ii)** une variété d'outils de gestion des dimensions thématiques et spatiales de l'information. Par exemple, il est possible d'interroger les Systèmes de Gestion de Base de Données en se basant sur des requêtes formulées : sélection des données relatives à un secteur donné (exemple : caractéristiques physiques du sol), combinaisons mathématiques (calcul de coefficient de perméabilité du sol). Ainsi cela permet d'obtenir des supports cartographiques (répartition spatiale de perméabilité du sol) directement exploitables par l'utilisateur ;
- **système d'analyse spatiale** : l'analyse spatiale de l'information représente l'outil le plus puissant d'un SIG. Elle constitue une extension des capacités d'interrogation des bases de données, en tenant en compte de l'interaction de plusieurs objets selon des critères et des conditions fixés. Le croisement de données, permet ainsi de créer de nouvelles tables d'informations. Le système d'analyse spatiale prélève donc l'information des bases de données géographiques et la complète à l'aide des résultats des analyses effectuées ;
- **système de représentation cartographique** : ce système permet de sélectionner des éléments de la BDG et de les représenter cartographiquement, en répondant à une problématique pluridisciplinaire.

1.3 Mode de représentation des données géographiques dans un SIG

Il existe deux modes principaux de représentation des données spatiales dans un SIG : le mode *raster* et le mode *vecteur* (COLLET, 1992).

- Le **mode vecteur** permet la représentation des objets dans un espace continu (non discrétisé) : les objets et leurs limites sont digitalisés et leur représentation se fait sous trois formes de base : les points (sources, dolines, gouffres, etc.), les polygones (réseau hydrographique, failles) et les polygones (limite d'une formation géologique, pédologique, d'un périmètre irrigué, etc.). Ce mode permet une représentation plus conforme à la réalité. La sortie des documents est d'une grande qualité. Le mode vecteur ne permet pas cependant de faire des calculs entre les différentes couches cartographiques du SIG.
- Le **mode raster** correspond à une division régulière de l'espace étudié en cellules rectangulaires ou carrées (pixel). Il est fortement lié à la notion d'image : les images satellitaires et les MNT (modèles numériques de terrain). Chaque pixel est référencé en ligne et en colonne et contient une valeur correspondant à une grandeur numérique. Ce mode de représentation est par contre adapté pour effectuer des calculs entre les différentes couches du SIG, constituées de pixels de même dimension. Les opérations sont effectuées entre chaque pixel de mêmes coordonnées.

Les deux modes de représentation (vecteur et raster) se complètent pour représenter et modéliser les couches d'informations. La superposition, la combinaison et la pondération de bases de données permettent l'obtention de nouvelles couches d'information. Il est important de noter qu'afin de pouvoir croiser les couches d'information, le choix de la maille spatiale est conditionné par la maille de référence du MNT (90 m). La maille 90 m a été appliquée à toutes les couches du SIG.

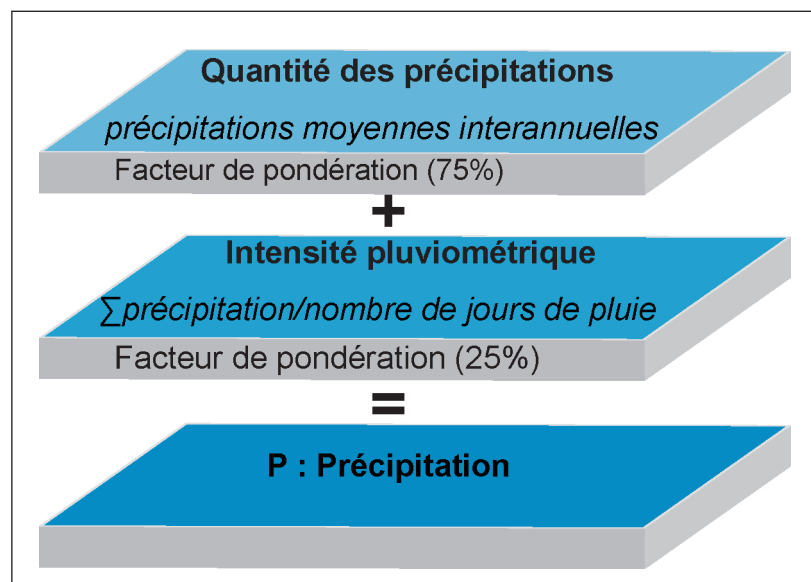
Dans le présent travail, les informations de référence ont été extraites de documents d'échelles et de nature variées : cartes topographiques, cadastres, cartes géologiques, cartes de végétation, carte pédologique, photographies aériennes, données statistiques (socio-économiques, climatiques, etc.). Il convient de mentionner que dans certains cas les données disponibles ne couvrent pas la totalité de la zone d'étude (exemple : la carte pédologique). Durant notre travail de thèse, la base de donnée a été complétée par des levés et des mesures sur le terrain (carte géomorphologique, analyses physico-chimiques des eaux, coefficient de perméabilité).

2. Paramètre P « Précipitations »

Dans un milieu méditerranéen semi-aride, les précipitations constituent le paramètre essentiel d'alimentation des aquifères karstiques. Deux facteurs conditionnent (directement et/ou indirectement) les processus d'alimentation et la recharge des aquifères souterrains : (i) la quantité des précipitations enregistrées et (ii) l'intensité pluviométrique. Le premier critère renseigne sur la fréquence de la pluie et par conséquent informe sur l'aridité ou au contraire l'humidité de la région. Le deuxième paramètre renseigne sur la nature des précipitations : pluies orageuses ou au contraire pluies efficaces. Le paramètre précipitation est un des seuls facteurs influençant la vulnérabilité des eaux karstiques qui se présente sous forme de données ponctuelles. La spatialisation est nécessaire, car les données offertes par les stations ne peuvent pas rendre compte de l'influence des précipitations sur la fragilité des ressources en eaux souterraines. L'évaluation du paramètre précipitation nécessite donc la disponibilité, la spatialisation et le croisement des données suivantes : précipitations moyennes interannuelles des stations de mesures et le nombre de jours de pluie (afin de calculer l'intensité pluviométrique de chaque station) (figure 3.2).

Il est important de noter que l'ensemble de la région est soumis à des conditions climatiques contraignantes, marquées par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes de précipitations (cf. partie climat).

Figure 3.2 : Sous critères composant du paramètre « précipitation ».



Les précipitations sont généralement brutales et se concentrent en quelques jours durant la période humide. Dans la zone d'étude, les précipitations peuvent se diviser en deux types :

- Les orages qui donnent des averses exceptionnelles tant par la quantité que par l'intensité ;
- Les pluies qui s'étalent sur quelques jours consécutifs, avec alternance d'intensité fortes à moyennes, ces pluies sont efficaces pour la recharge des aquifères karstiques.

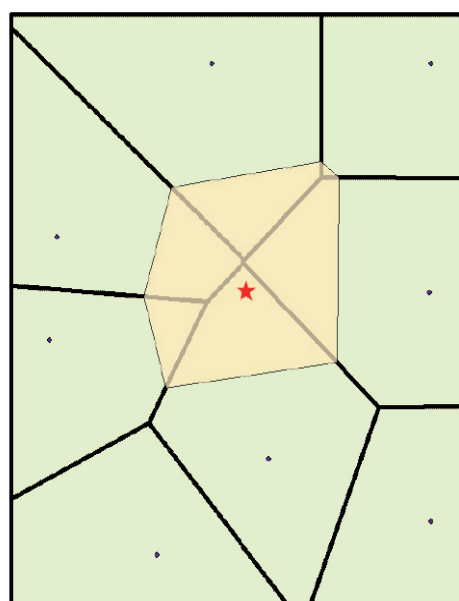
Ces deux comportements pluviométriques influencent les modalités de la recharge des aquifères karstiques d'où l'évaluation des critères « quantité des précipitations » et « intensité pluviométrique ».

Pour la spatialisation du paramètre « précipitation », l'étude s'appuie sur les stations de mesure suivantes : Berkane, Tafouralet et Ain Almou qui encadrent la zone d'étude, la station de Silmania située au nord ouest, et les stations d'Oujda et Al Youne qui sont localisées au sud. L'éloignement de ces deux dernières stations de la zone d'étude constitue une contrainte pour une spatialisation optimale des critères évalués.

Dans le présent travail, nous nous sommes basés sur la période d'observation (2001/2004). Le manque de données sur le nombre de jours de pluie pour les stations d'Oujda et Al Youne a été la cause principale de la limitation sur cette période.

Pour la modélisation de la fréquence et de l'intensité pluviométrique nous nous sommes basés sur la méthode de Thiessen (figure 3.3). N'ayant que 6 stations, il a été choisi d'appliquer la méthode Thiessen. Cette méthode est simple et rapide de mettre en œuvre. Ce paramètre peut être affiné par les critères altitude, exposition, abris. Ces critères structurent la répartition spatiale des pluies en montagne. La spatialisation a été réalisée à l'aide du SIG. L'objectif de l'interpolation est de rechercher le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et leur appliquer une pondération sur la base de surfaces proportionnelles dans le but d'interpoler une valeur (Sibson, 1981). L'interpolation est effectuée en plusieurs étapes : au départ, un diagramme de Voronoï² est constitué de tous les points donnés, représentés par les polygones de couleur vert olive. Un nouveau polygone de Voronoï, de couleur beige, est ensuite créé autour du point d'interpolation (étoile rouge). La proportion de superposition entre ce nouveau polygone et les polygones initiaux est alors utilisée comme pondération (BAILLARGEON, 2005).

Figure 3.3 : Création de polygone de Thiessen à partir d'une interpolation du voisin naturel.



Source : Copyright 1999-2006 ESRI

2. Représente une décomposition particulière d'un espace métrique déterminée par les distances à un ensemble discret d'objets de l'espace, en général un ensemble discret de points.

2.1. Critère « Quantité des précipitations »

L'évaluation du critère « quantité des précipitations » a été établie à partir de l'attribution des indices de vulnérabilité aux classes de précipitation estimées (spatialisation du critère « quantité des précipitations ») à partir de la méthode de Theissen. L'application du classement proposé par VIAS (2006) n'est pas possible à cause de faibles précipitations enregistrées dans la zone d'étude. Le total interannuel se situe, selon les stations, entre 265 et 551 mm, tandis que l'évaluation proposée par VIAS classe les précipitations moyennes interannuelles variant de 400 à 1 600 mm. Pour évaluer l'impact de la répartition pluviométrique, à l'échelle de la zone d'étude, nous proposons quatre classes de vulnérabilité allant de faible à très forte (tableau 3.1). Ce classement propre à cette étude, pourra être modifié dans les futures études. L'objectif de ce classement arbitraire (100 mm d'intervalle entre les différentes classes) est de mettre l'accent sur l'interaction *quantité de précipitation et recharge des aquifères karstiques*. L'indice de très forte vulnérabilité est attribué aux moyennes interannuelles inférieures à 300 mm/an, avec des précipitations aussi faibles, nous considérons que les aquifères karstiques n'atteignent pas un rechargement satisfaisant. Selon L'OPEZ-GETA *et al.*, (2004), dans les aquifères carbonatés autour la Méditerranée, la recharge annuelle moyenne se situe entre 35 et 55% des précipitations annuelles, donc quand les précipitations sont faibles la recharge est faible. La méthode SINTACS (CIVITA, 1994) propose une réduction de la vulnérabilité de la recharge lorsque les précipitations sont supérieures à 300 mm/an, c'est dans cette logique, que la vulnérabilité diminue quand les précipitations sont supérieures à 300 mm par an. En contre partie nous estimons que lorsque les précipitations sont supérieures à 500 mm/an le rechargement des aquifères est assuré.

Tableau 3.1 : Classes d'évaluation du paramètre « Quantité des précipitations ».

Source : (VIAS *et al.*, 2006) modifié

Précipitations (mm/an)	Indice de vulnérabilité
> 500	1
(400 - 500)	2
(300 - 400)	3
< 300	4

- **Indice 1** représente les zones les plus humides, à l'échelle de la zone d'étude, qui reçoivent une moyenne interannuelle supérieure à 500 mm/an. Ces zones correspondent à une vulnérabilité faible, l'importance relative des précipitations assure l'alimentation des aquifères karstiques ;
- **Indice 2** est attribué aux zones dans lesquelles les précipitations moyennes interannuelles varient de 500 à 400 mm/an. Nous considérons que ces zones présentent une vulnérabilité moyenne par rapport à la recharge des aquifères karstiques ;
- **Indice 3** comprend les zones caractérisées par des précipitations allant de 300 à 400 mm/ an. La faiblesse des précipitations laisse supposer une vulnérabilité forte de la quantité des précipitations enregistrées en fonction de la recharge karstique ;
- **Indice 4** comprend les zones dans lesquelles les précipitations moyennes interannuelles sont inférieures à 300 mm/an. Cette classe représente les zones les plus vulnérables dans la mesure où les précipitations enregistrées sont très faibles pour assurer l'alimentation des aquifères souterrains.

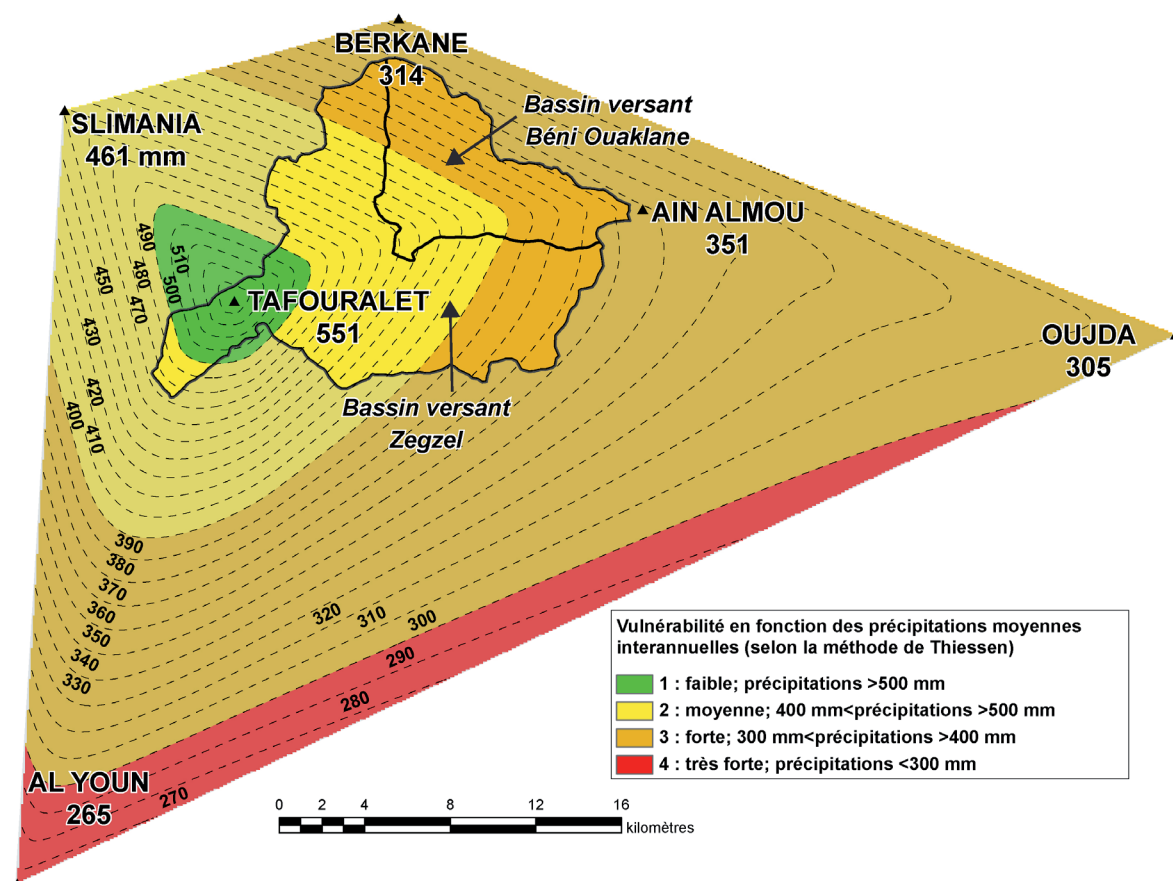


Figure 3.4 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du paramètre « quantité des précipitations » région nord est du Maroc (2001/2004).

La répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du paramètre « précipitations » (figure 3.4) montre que la position géographique des stations a une forte influence sur le résultat obtenu. Au sud, les stations reflètent l'effet de la continentalité avec une moyenne interannuelle faible de 305 mm/an à Oujda et 265 mm/an à El Youne. Les stations Tafoutalet et Slimania enregistrent les moyennes interannuelles les plus élevées (551 et 461 mm/an respectivement). La station d'Ain Almou située à 1 830 m d'altitude (l'altitude la plus élevée) enregistre 351 mm. Ceci peut être lié aux influences des perturbations atlantiques, et enfin la station de Berkane (située en plaine) enregistre une valeur de 314 mm/an. Le faible nombre de stations a une influence sur le résultat final. Ce choix, très arbitraire, pourra être revu quand on disposera d'autres éléments pour affiner la spatialisation du paramètre « précipitations ». A l'échelle des deux bassins versants investis (Zegzel et Béni Ouaklane), la répartition spatiale du critère « quantité des précipitations » donne trois classes de vulnérabilité allant de faible à forte :

- les zones de faible vulnérabilité qui reçoivent une moyenne interannuelle supérieure à 500 mm ;
- les zones de moyenne vulnérabilité dans lesquelles la moyenne interannuelle des précipitations varie entre 400 et 500 mm ;
- les zones de forte vulnérabilité : se sont les zones qui enregistrent une moyenne interannuelle entre 400 et 300 mm.

Le critère « quantité des précipitations » ne traduit en aucun cas l'irrégularité temporelle des précipitations ni sa nature (pluie orageuse, pluie de longue durée). Pour apprécier l'influence de

l'irrégularité temporelle, l'étude du critère « intensité pluviométrique » est indispensable.

2.2. Critère « Intensité pluviométrique »

Le critère « Intensité pluviométrique » concerne la distribution temporelle des précipitations et renseigne sur la nature des précipitations enregistrées. La région se caractérise par des précipitations à caractère orageux et irrégulier. Les pluies sont réparties sur un petit nombre de jours, cette concentration a un impact direct sur l'infiltration et/ou le ruissellement des eaux. Les jours de pluies correspondent, généralement aux périodes humides (de novembre à mai). Les averses violentes et brutales sont séparées par des longues périodes sans pluie au sein même de période humide (cf. partie climat). Ces conditions d'extrême sécheresse ont une influence certaine sur la recharge et le fonctionnement hydrogéologique des aquifères karstiques.

Pour l'évaluation du critère « Intensité pluviométrique » en fonction de la recharge des aquifères karstiques, nous proposons la classification présentée dans le tableau 3.2. L'intensité pluviométrique enregistrée pour les six stations étudiées varie de 7,9 à 15,6, Ceci empêche l'application du classement proposé par VIAS (2006) qui attribue un intervalle de 10 au classement de valeurs. Suite à la faible variation des valeurs obtenues, dans ce cas d'étude, nous attribuons un intervalle de 5, afin de bien visualiser la variation de la répartition spatiale de l'intensité pluviométrique.

Tableau 3.2 : Classes d'évaluation du paramètre « Intensité pluviométrique » (mm/j).

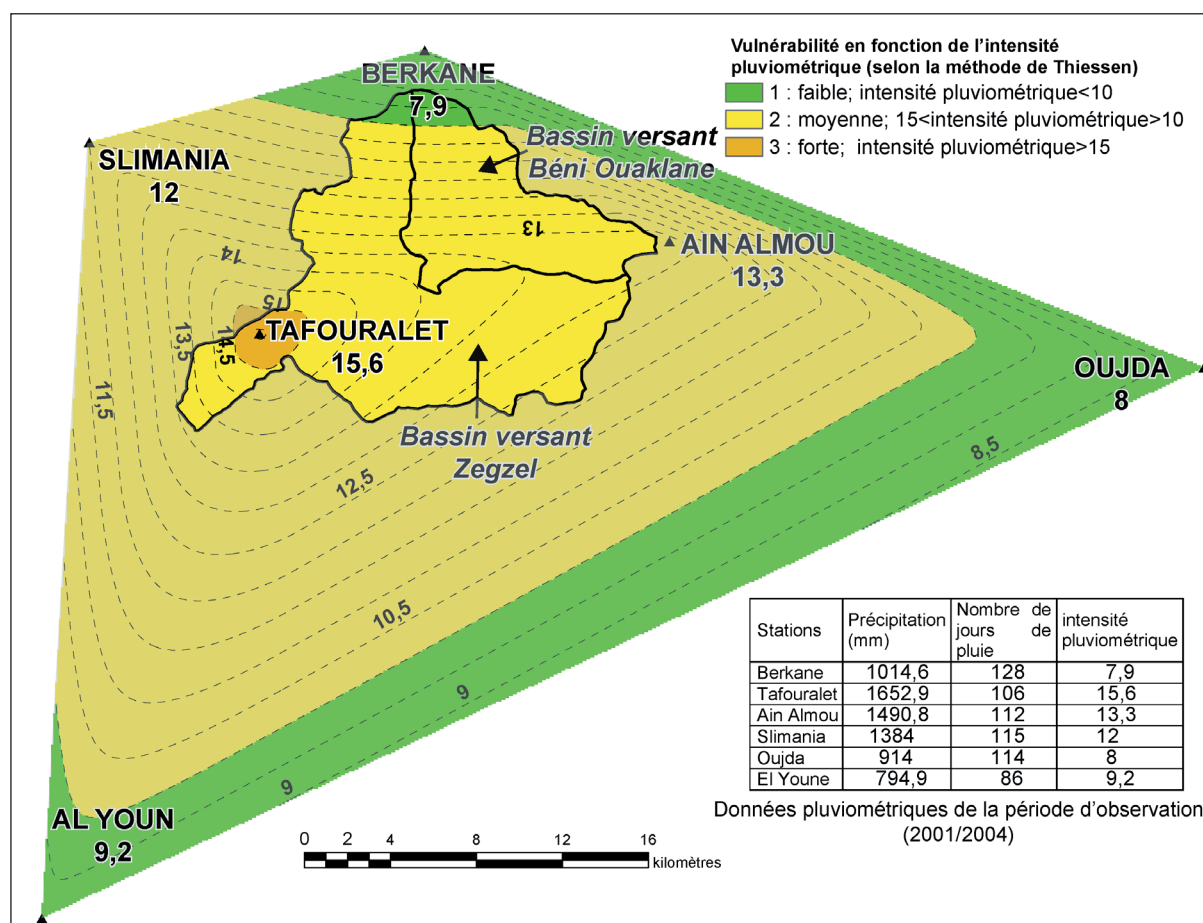
<i>Intensité Pluviométrique</i>	<i>Indice de vulnérabilité</i>
< 10	1
(10 - 15)	2
> 15	3

Source : (VIAS *et al.*, 2006) modifié

- **l'indice 1** présente les zones de faible intensité pluviométrique : inférieure à 10 (VIAS *et al.*, 2006). Ces zones correspondent à une vulnérabilité faible. Les précipitations sont réparties sur un nombre de jours relativement important. Ce qui signifie que les pluies s'étalent sur une longue durée. Ces pluies sont efficaces, elles permettent une infiltration diffuse et lente des eaux. Ces valeurs sont présentées en vert dans la figure 3.4, elles couvrent les zones dans lesquelles l'intensité pluviométrique est faible (Berkane, Oujda et Al Youne). A titre d'exemple, la station de Berkane a enregistré un total de pluie de 1017,6 pendant la période d'observation 2001/2004, les pluies ont été réparties sur 128 jours sur un total de jours de 1096 (les trois ans d'observation), ceci a donné une intensité pluviométrique de 7,9. Les stations d'Oujda et El Ayoune présentent une intensité faible de 8 et 9,2 respectivement ;
- **l'indice 2** est attribué aux zones dans lesquelles l'intensité pluviométrique varie de 10 à 15. Nous considérons que ces zones présentent une vulnérabilité moyenne par rapport à la recharge des aquifères karstiques. Ces zones reçoivent des quantités importantes de pluie concentrées sur un petit nombre de jours. Ce qui reflète le caractère orageux des pluies. La vulnérabilité moyenne couvre les zones présentées en jaune dont les stations Ain Almou et Slimania (figure 3.5). Par exemple, 1491 mm sont tombés sur 112 jours à Ain Almou pendant la période d'observation. Ceci donne une intensité de 13,3 ce qui s'associe à un ruissellement torrentiel des pluies au lieu d'une infiltration. La station de Slimania enregistre une intensité pluviométrique moyennement vulnérable par rapport à l'infiltration avec une intensité qui s'élève à 12 ;

- **l'indice 3** correspond aux zones caractérisées par une intensité pluviométrique supérieure à 15. La forte intensité due aux précipitations violentes concentrées sur un petit nombre de jours de pluie. Ceci s'exprime par des précipitations sous forme d'averses violentes et favorise le ruissellement des eaux de pluie en empêchant l'infiltration. Ce comportement a une influence directe sur la recharge souterraine. Ces valeurs correspondent à la station de Tafouralet. Pendant la période d'observation, la station a enregistré un total de 1 653 mm répartis sur 106 jours. Dans ce contexte, l'alimentation s'effectue essentiellement via les points d'infiltrations concentrées. Les eaux infiltrées sont généralement chargées de particules fines, à cause de l'intensité pluviométrique élevée des pluies. L'analyse des données pluviométriques montre également que 990 jours de la période de référence sont sans pluie ce qui donne une sécheresse sévère, séparée par quelques jours de pluies à caractère orageux.

L'application de cette indexation a permis d'obtenir la spatialisation du paramètre « intensité pluviométrique ». La carte d'évaluation de la vulnérabilité de l'infiltration en fonction de l'intensité pluviométrique permet de distinguer les trois classes de vulnérabilité (figure 3.5).



(Intensité pluviométrique : $\sum P / Nb \text{ de jours de pluie}$).

Figure 3.5 : Répartition spatiale des classes de vulnérabilité en fonction de l'intensité pluviométrique région nord est du Maroc (2001/2004).

2.3. L'obtention de la carte P « Précipitation »

Après avoir spatialisé les deux couches d'information : « Quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique » qui composent le paramètre « précipitation », la démarche suivante consiste à les croiser à l'aide de l'outil SIG. Le croisement de ces deux critères permet d'apprécier leur influence sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Il est important de souligner que nous avons donné un poids deux fois plus important à l'intensité pluviométrique. Dans le milieu méditerranéen la nature des précipitations conditionne le ruissellement où au contraire l'infiltration d'où le choix de pondération au critère « intensité pluviométrique ».

A l'échelle d'application on distingue trois classes de vulnérabilité (Figure 3.6) :

- la vulnérabilité faible est située dans les zones qui croisent à la fois les zones les plus arrosées (précipitations moyennes interannuelles supérieures à 500 mm) et dans lesquelles l'intensité pluviométrique est inférieure à 15. Ces zones correspondent à des quantités de pluies relativement importantes. De telles circonstances, laissent supposer que les volumes de recharge des aquifères karstiques dans les zones sont relativement conséquents par rapport au reste de la région étudiée. Dans la carte ces zones sont présentées en vert ;
- la vulnérabilité moyenne correspond au croisement de trois types d'informations : (a) zones arrosées (précipitations interannuelles supérieures à 500 mm) avec une intensité élevée (supérieure à 15) ce qui reflète le caractère orageux des pluies ; (b) zones moyennement arrosées (précipitations moyennes interannuelles entre 400 et 500 mm) avec une intensité moyenne (entre 10 et 15) ; et zones faiblement arrosées (précipitations moyennes interannuelles inférieures à 300 mm) avec une intensité pluviométrique faible (inférieure à 10). Il est important de signaler que seulement les deux cas couvrent les deux bassins versants investis. Le croisement de l'indice de faible et moyenne vulnérabilité des deux critères croisés donne une vulnérabilité moyenne du paramètre obtenu ;
- la vulnérabilité forte est présente dans les zones où les deux couches d'informations (quantité et intensité pluviométrique) croisent un indice de moyenne et/ou de forte vulnérabilité. Le croisement de ces valeurs donne une vulnérabilité forte à cause d'une part de faibles précipitations d'autre part parce qu'elles reflètent le prolongement des périodes sèches.

Cette carte constitue une couche d'information indispensable dans l'évaluation de la vulnérabilité globale de la zone d'étude

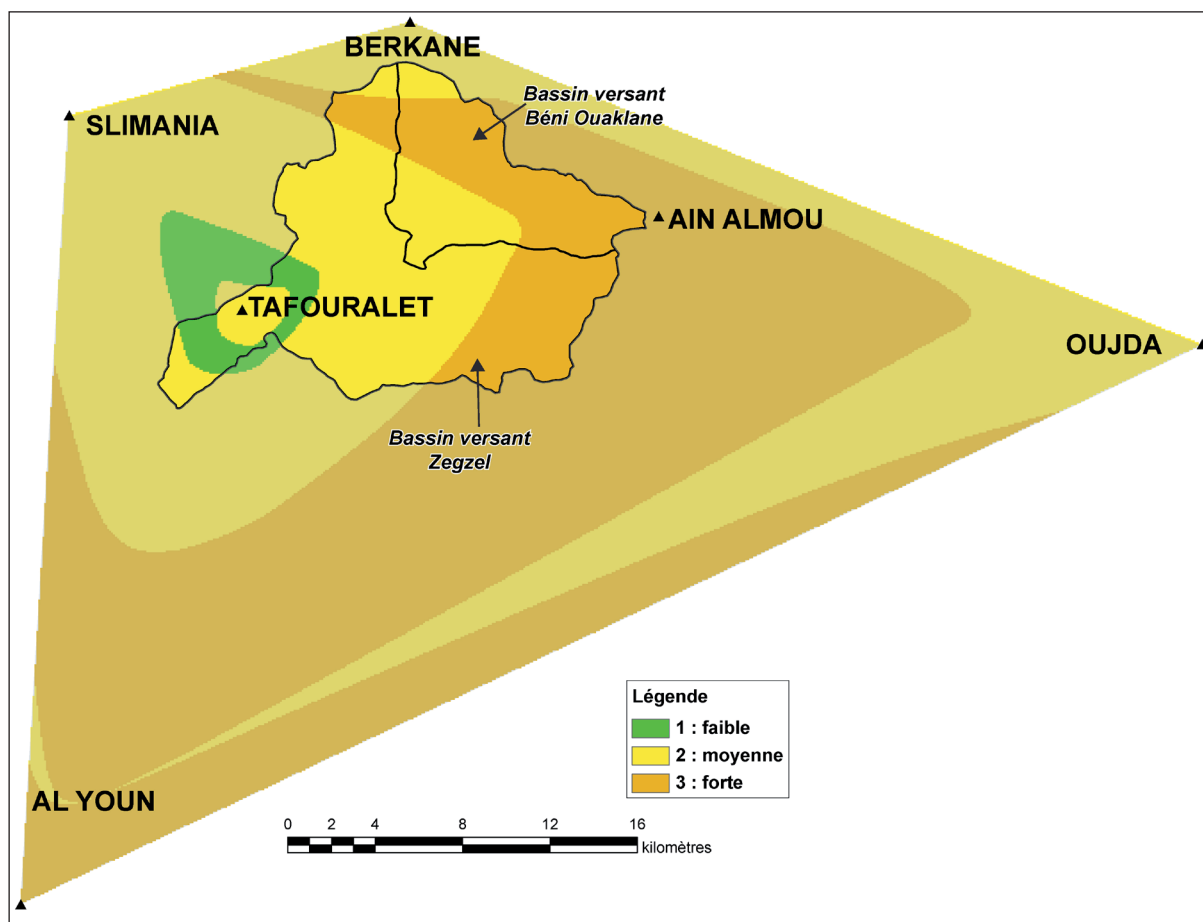


Figure 3.6 : Carte de vulnérabilité du paramètre « Précipitation » en fonction du croisement des sous critères « quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique » région nord est du Maroc (2001/2004)

3. Paramètre « Couverture protectrice »

Les couches pédologiques et les formations superficielles forment une couverture protectrice et régulatrice au dessus des roches karstifiées. Il est donc important d'évaluer le pouvoir protecteur et/ou régulateur des sols vis-à-vis de l'infiltration. En fonction des paramètres physiques (épaisseur, texture teneur en cailloux, pourcentage de matière organique, etc.), les sols et les formations superficielles peuvent avoir un rôle de stockage temporaire et provoquent un effet retardateur de l'infiltration des eaux météorologiques vers les aquifères karstiques en jouant le rôle, en subsurface, « d'un réservoir poreux ». Elles peuvent également avoir un effet contraire « couche imperméable » en favorisant plutôt le ruissellement des eaux.

Pour l'évaluation du paramètre P en fonction de la recharge des aquifères karstiques, deux sous critères sont pris en compte (figure 3.7) :

- la conductivité hydraulique ;
- l'épaisseur.

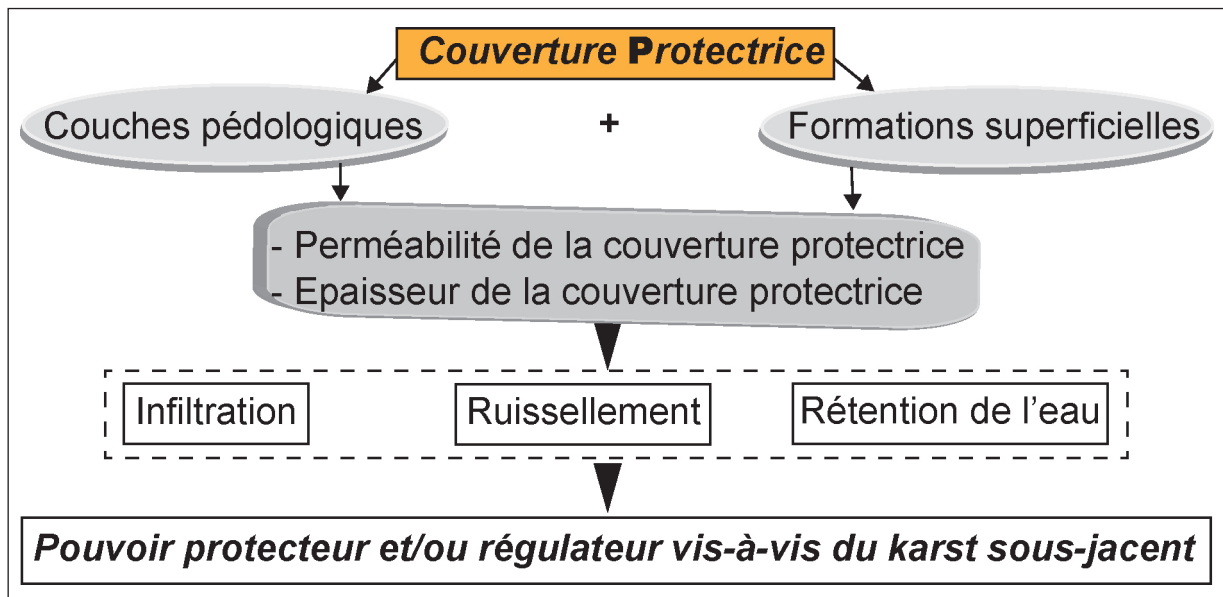


Figure 3.7 : Influence des sous critères du paramètre « couverture Protectrice » vis-à-vis de l'infiltration

3.1. Indice de vulnérabilité en fonction de la conductivité hydraulique

L'infiltration est conditionnée par les caractéristiques physiques du sol : texture, structure, teneur en matière organique et en minéraux argileux. Il a été possible ici de classer la perméabilité du sol à l'aide des fonctions de pédotransfert « Roseta » (SAXTON *et al.*, 2006; SCHAAP, 1999; 2005; SCHAAP *et al.*, 2001).

Ce travail a été réalisé sur le terrain et par des analyses en laboratoire. Il a été organisé en utilisant la carte pédologique « sol dans le massif des Béni Snassen centraux » (BOUMEAZA, 1985). Cette dernière a été regroupée en grandes unités en fonction des paramètres physiques des sols. En ce qui concerne la cartographie des formations superficielles, nous nous sommes basés sur les cartes géologiques existantes (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie 2001; 2004) et la carte géomorphologique réalisée sur le terrain (cf. figure 1.12).

Pour la détermination de la conductivité hydraulique, nous avons échantillonné les différents sols (20 échantillons). Au laboratoire, nous avons déterminé la texture, la teneur en matière organique et la densité apparente. A l'aide du logiciel de prédiction « Roseta » nous avons pu obtenir une carte de conductivité hydraulique structurée en quatre classes (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000; United States. Department of Agriculture, 1951). Les classes de perméabilité du sol varient de 2 cm³/h à 12,7 cm³/h. L'évaluation du critère conductivité hydraulique a été établie à partir de l'attribution des indices de vulnérabilité aux classes définies. Nous avons également attribué des indices de vulnérabilité en fonction de la perméabilité aux formations superficielles. L'évaluation du critère conductivité hydraulique se présente comme suit (tableau 3.3).

La carte de la conductivité hydraulique est réalisée à l'échelle des deux bassins investis. Elle révèle la variation spatiale de perméabilité d'une formation à une autre (figure 3.8) :

Tableau 3.3 : Evaluation du critère « perméabilité » de la couverture protectrice.

	Perméabilité	k (cm/h)	Indice de vulnérabilité
Sol	Très rapide	>12.7	0
	Rapide	6.35 à 12.7	1
	Moyenne	2 à 6.35	2
	Lente	<2	3
	Sol absent		4
F. superficielles	Eboulis (galets, blocs, argiles sableuses)		1
	Travertins poreux		2
	Terrasses (argiles, sables, graviers)		3

Source : (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000; SOIL SURVEY STAFF, 1993)

- **l'indice 0** présente les formations de *très faible vulnérabilité*, les sols correspondant à cette classe, présentent 10 % soit 14 km² de la zone d'étude. Dans cette catégorie, la couverture protectrice est combinée à une perméabilité supérieure à 12,7 cm/h ce qui reflète une infiltration importante des eaux. Parmi les sols qui se caractérisent par une conductivité hydraulique élevée nous citons les sols rouges fersiallitiques sur schistes (13,8) ;
- **l'indice 1** est attribué aux formations caractérisées par une rapide perméabilité dont la vitesse varie de 6,35 et 12,5 cm/h. Ces formations présentent une *faible vulnérabilité*. Elles couvrent des superficies importantes (30% de la zone d'étude, soit 48 km²) ; parmi les sols identifiés dans cette classe, il y a les sols rouges fersiallitiques sur calcaires dolomitiques (11,2 cm/h), les rendzines colluviales (11,7 cm/h), etc. Les éboulis sont rangés dans cette classe de vulnérabilité ;
- **l'indice 2** présente les sols de moyenne perméabilité dans lesquels la vitesse de perméabilité est comprise entre 2 et 6,35 cm/h. Cet indice comprend les surfaces de *moyenne vulnérabilité*. Ces surfaces présentent 19 % de la zone d'étude soit 41 km². Parmi les formations pédologiques formant cette classe, on trouve les rendzines ravinées sur marno-calcaires avec une perméabilité de (5,1 cm/h), les sols rouges fersiallitiques sur grès dolomitiques dans lesquels la conductivité hydraulique est de (4,8 cm/h). Les travertins poreux sont intégrés dans cette classe ;
- **l'indice 3** comprend les sols dans lesquels la vitesse de la perméabilité est lente (inférieure à 2 cm/h). Cette perméabilité laisse supposer une *forte vulnérabilité*. Ces zones occupent 13 % soit 32 km². Cette classe est constituée essentiellement de sols rouges fersiallitiques lessivés sur calcaires dolomitiques. Les terrasses fluviales, constituées essentiellement d'argiles, sables et graviers, sont placées dans cette classe de vulnérabilité. Les propriétés physiques de ces formations laissent supposer un faible transfert des eaux, qui empruntent ces couches, vers les formations karstiques qui les portent ;
- **l'indice 4** comprend les zones dans lesquelles le sol est absent. Cette classe représente les surfaces de *très forte vulnérabilité* dans la mesure où le rôle protecteur de la couverture protectrice est absent. Ces zones couvrent 6 % soit 11 km² de la superficie totale de la zone d'étude.

22% soit 43 km² de la zone d'étude n'est pas évaluée à cause du manque de données. Les terrains non évalués, ne sont pas traités dans la carte pédologique de référence (BOUMEAZA, 1985).

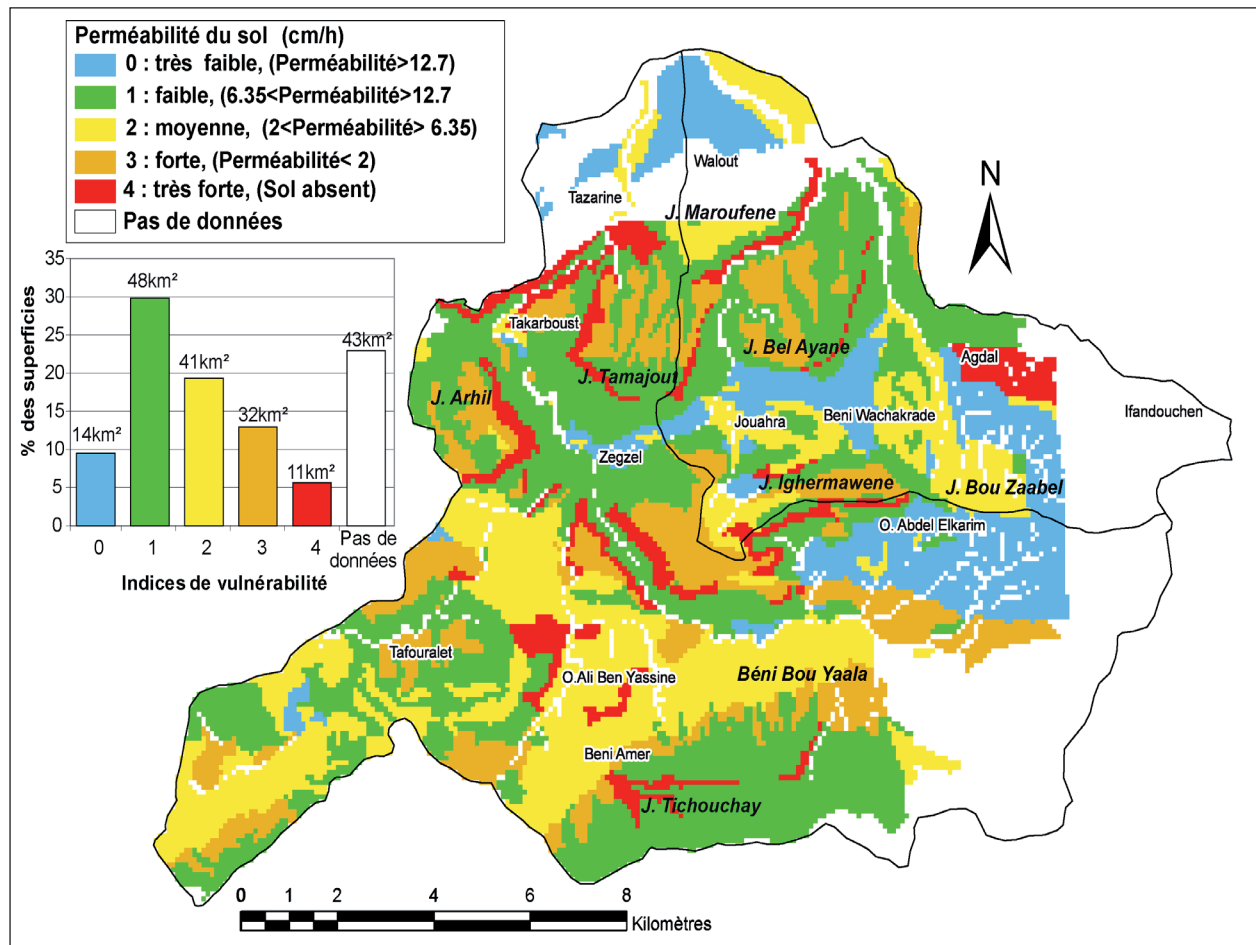


Figure 3.8 : Vulnérabilité à l'infiltration en fonction de la perméabilité des sols.

3. 2. Indice de la vulnérabilité en fonction de l'épaisseur

Le deuxième paramètre important pour la couverture protectrice est l'épaisseur. Les informations concernant ce paramètre ont été collectées à partir du terrain et les références bibliographiques (BOUMEAZA, 1985; RUELLAN, 1971).

Quatre classes d'indice de vulnérabilité en fonction de la recharge des aquifères karstiques ont été retenues pour ce paramètre (tableau 3.4). Cette classification applique le découpage utilisé dans la méthode « EPIK » (DOERFLIGER *et al.*, 1998) avec une modification dans les indices de moyenne et forte vulnérabilité. Cette adaptation de classement s'impose dans la mesure où la méthode « EPIK » est appliquée dans un milieu tempéré dans lequel les sols sont assez développés en comparaison avec les sols en régions karstiques méditerranéennes.

L'application des indexations attribuées à chaque classe d'épaisseur, permet d'illustrer la vulnérabilité en fonction de l'épaisseur de la couverture protectrice (figure 3.9).

- **l'indice 1** correspond aux zones de *faible vulnérabilité* dans lesquelles l'épaisseur du sol est inférieure à 20 cm. Pour ces formations, on considère que les eaux de pluie peuvent s'infiltrer à travers ces couches pour alimenter le karst. Ces formations sont constituées des régosols et de rendzines ;
- **l'indice 2** correspond aux zones de *moyenne vulnérabilité* dans lesquelles l'épaisseur du sol est comprise entre 20 et 50 cm. L'importance de l'épaisseur peut empêcher le transit du fluide liquide vers le karst sous-jacent. Dans cette catégorie, nous trouvons les sols rouges

fersiallitiques sur schistes dans lesquels l'épaisseur est d'environ 45 cm, les sols bruns calcaires à encroûtements calcaires, dont l'épaisseur moyenne est de 28 cm, les rendzines encroûtées humifères avec une épaisseur de 22 cm environ ;

- **l'indice 3** correspond aux zones de *forte vulnérabilité* dans lesquelles l'épaisseur du sol est supérieure à 50 cm. Dans cette classe, nous pouvons citer les sols rouges sur grès dolomitiques et calcaires et les sols bruns calcaires à caractère vertique par endroit. Ces formations peuvent atteindre plusieurs mètres surtout en ce qui concerne les formations superficielles. Ici nous considérons que les eaux météorologiques généralement orageuses qui pénètrent les couches protectrices aboutissent rarement aux drains karstiques ;
- **Indice 4** correspond aux zones de *très forte vulnérabilité* dans lesquelles le sol est absent. Vu le caractère orageux des précipitations, qui sont généralement violentes, l'absence de la couverture protectrice favorise le ruissellement torrentiel et empêche l'infiltration.

Tableau 3.4 : Evaluation du critère épaisseur de la couverture protectrice.

<i>Epaisseur (cm)</i>	<i>Indice de vulnérabilité</i>
0<Epaisseur >20	1
20 <Epaisseur >50	2
Epaisseur > 50	3
Sans couverture protectrice	4

Source : (DOERFLIGER *et al.*, 1998) modifié

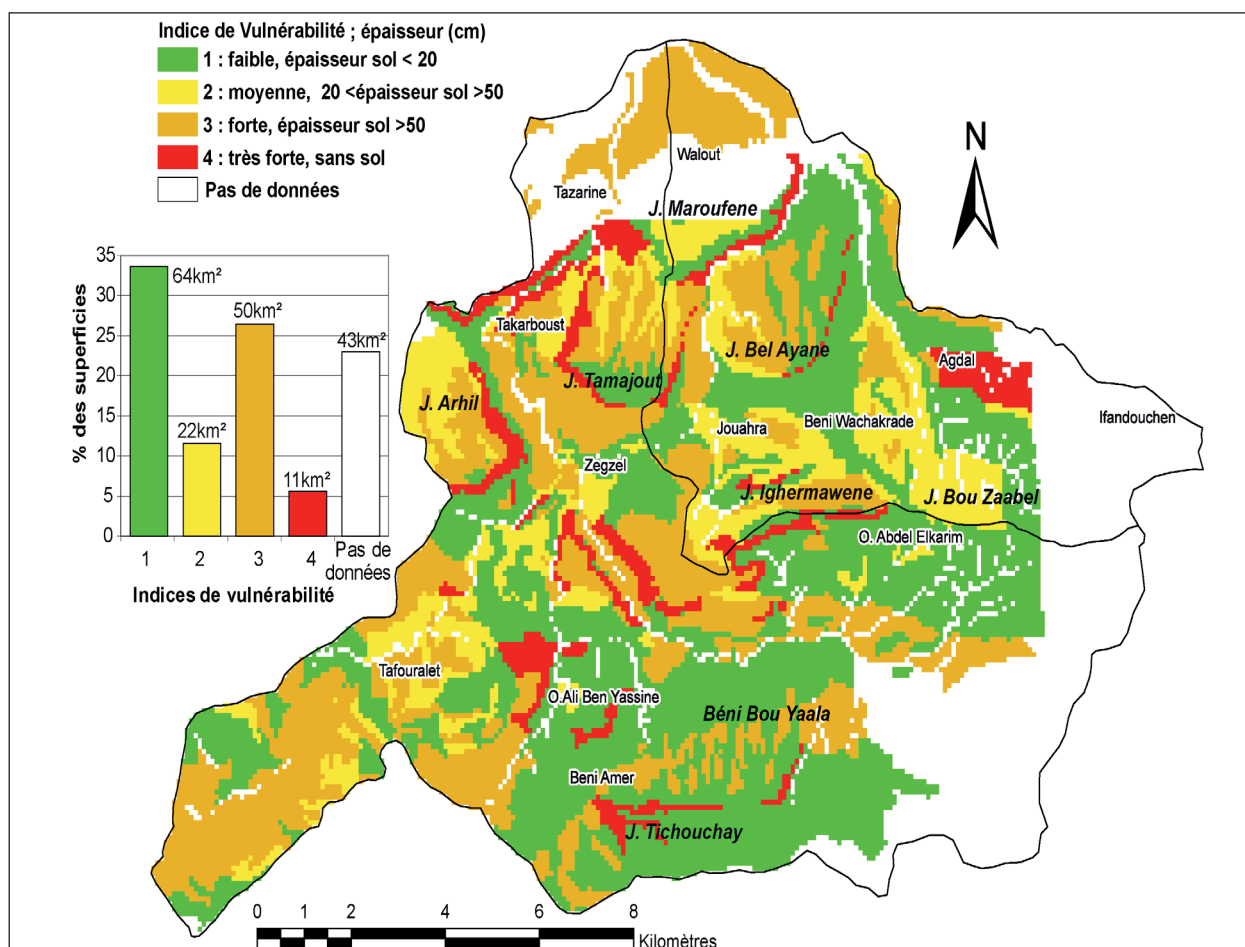


Figure 3.9 : Vulnérabilité des sols par rapport à l'épaisseur de la couverture protectrice.

La répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction de l'épaisseur est très hétérogène dans l'espace. Les formations de *faible vulnérabilité* sont les plus répandues avec 65 km² soit 34 % de la superficie globale de la zone d'étude. Les formations de *forte vulnérabilité* occupent le deuxième rang avec une superficie de 50 km² soit 26 %. Les indices de *moyenne* et *très forte vulnérabilité* présentent 22 km² et 11 km² respectivement.

L'absence de données constitue un réel handicap dans l'évaluation de la couverture protectrice à l'échelle des deux bassins versants. 22 % de la superficie totale, soit 43 km² ne livrent aucunes informations concernant les deux paramètres traités (perméabilité et épaisseur de la couverture protectrice). Cette lacune aura un impact sur le croisement du paramètre « couverture protectrice » avec les autres facteurs intervenant dans la vulnérabilité des eaux souterraines.

3.3. Obtention de la carte P « couverture protectrice »

L'obtention de la carte P est le résultat du croisement des deux couches d'informations : carte de vulnérabilité en fonction de la perméabilité (Figure 3.8) et carte de vulnérabilité en fonction de l'épaisseur (Figure 3.9). Cette opération implique la définition d'un facteur de pondération pour ces deux critères. Le choix de celui-ci est très délicat. Pour cela, nous testons différents poids d'importance pour chacun des critères retenus pour mieux apprécier leurs influences sur la répartition spatiale de la vulnérabilité.

La combinaison des deux paramètres perméabilité et épaisseur de la couverture protectrice permet la réalisation de la carte P. Dans ce travail, nous proposons deux cas de figures selon l'importance de poids des sous critères (figure 3.10) :

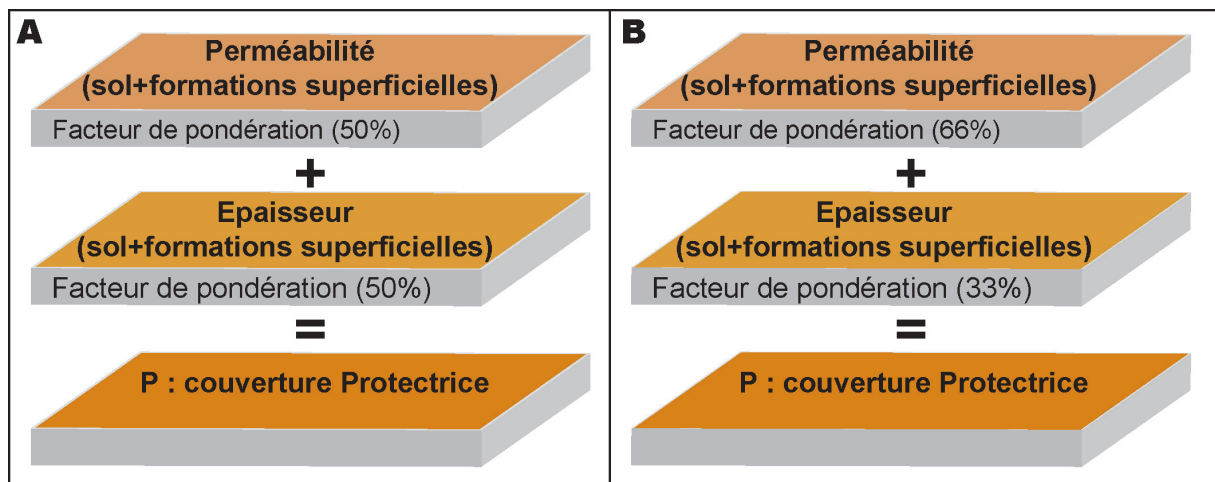


Figure 3.10 : Facteurs de pondérations des couches d'informations (perméabilité et épaisseur) dans l'évaluation du paramètre P « couverture Protectrice ».

- 1 - la carte A, considère que les deux critères conductivité hydraulique et épaisseur ont le même poids d'importance ;
- 2 - Pour la carte B, dans la mesure où la conductivité hydraulique des couches protectrices permet l'infiltration des eaux météoriques vers les aquifères où au contraire le ruissellement des eaux, nous attribuons un facteur de pondération de 66 % à ce paramètre par rapport à 33 % au paramètre épaisseur. Donc, le critère conductivité hydraulique présente un poids deux fois plus important que le critère épaisseur.

L'objectif ici, est de ne pas faire un choix de cartes obtenues, mais en revanche de mettre l'accent sur le poids de contrôle de l'infiltration et de la recharge des aquifères karstiques, joué par

les deux paramètres « perméabilité » et « épaisseur » de la couverture protectrice. L'évaluation de la vulnérabilité de ces deux paramètres contrôle, en effet, la répartition spatiale de la vulnérabilité. L'application d'une approche qui a pour objectif de tester différents poids, met en avant l'importance de la prise en compte des deux facteurs (« perméabilité » et « épaisseur ») démarche qui reste limitée. Généralement, les méthodes d'évaluations se basent uniquement sur l'évaluation de l'épaisseur de la couverture protectrice, exemple la méthode « EPIK ».

La figure 3.11 propose les résultats des facteurs de pondération testés. Les deux cartes obtenues présentent une spatialisation variable de l'indice de vulnérabilité en fonction de la perméabilité et l'épaisseur de la couverture protectrice.

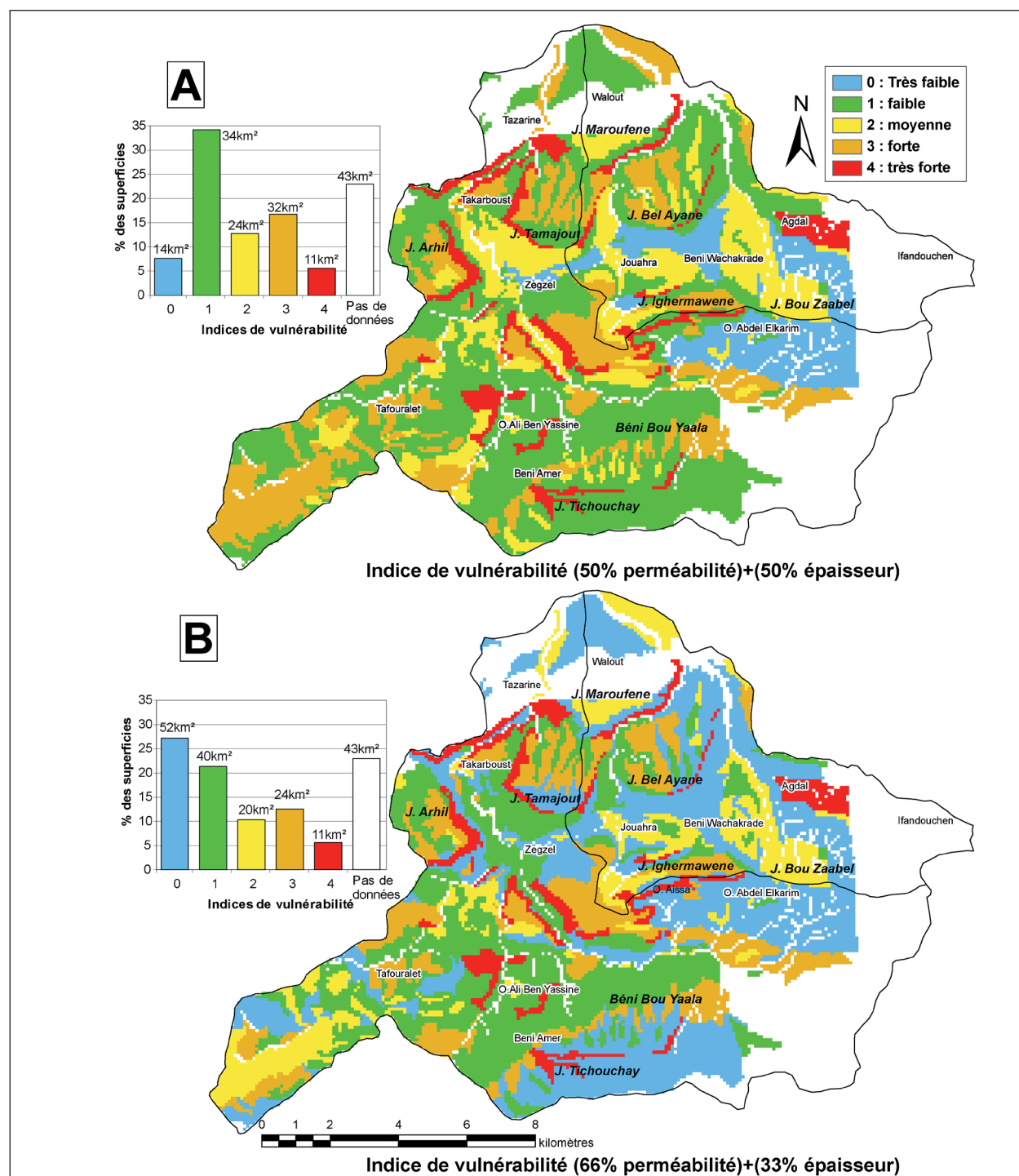


Figure 3.11 : Résultats d'évaluation et de croisement de la couverture protectrice.

La carte A considère que les deux sous critères « perméabilité » et « épaisseur » de la couverture protectrice ont le même poids. Elle donne à la zone d'étude une image d'un milieu plus vulnérable avec une surface des zones de *forte vulnérabilité* équivalente à 32 km², soit 17 % de la zone évaluée. Cet indice prend en compte les formations dont la perméabilité est lente (inférieure à 2 cm/h) et l'épaisseur est supérieure à 50 cm. Dans cette carte, la superficie des indices de *moyenne vulnérabilité* est de 24 km² soit 13 %. L'indice de faible vulnérabilité couvre une superficie de 65 km² (34 %). Enfin l'indice de *très faible vulnérabilité* présente seulement 14 km² (8 %).

En ce qui concerne **la carte B**, dans laquelle le sous critère « perméabilité » du sol est deux fois plus important que « l'épaisseur », la surface de zones de *forte vulnérabilité* est de 24 km², soit 13 % de la zone d'étude. L'atténuation de la vulnérabilité est lié au poids important accordé au paramètre « perméabilité ». La superficie des indices de *moyenne vulnérabilité* est de 20 km² soit 10 % dans la carte B. Les couches correspondantes à cet indice sont susceptibles de favoriser une infiltration moyenne des eaux de pluies. L'indice de faible vulnérabilité couvre une superficie de 40 km² (21 %). En revanche l'indice de *très faible vulnérabilité* est de 52 km² (27 %).

La variation de la répartition spatiale dans les deux cartes est liée aux poids attribué de à chaque critères. Dans la carte B, quand les formations de la couverture protectrice ont une perméabilité forte, la vulnérabilité baisse même si l'épaisseur est importante. L'atténuation de la vulnérabilité est lisible dans les zones suivantes : jbel Tichouchay, Zegzel, jbel Tamajout, jbel Bel Ayane, etc. Ceci met l'accent sur l'importance de la prise en compte des critères « perméabilité » et « épaisseur » séparément afin de mieux apprécier l'influence de chacun dans le contrôle de l'infiltration des eaux. Les couches de *très forte vulnérabilité* sont les mêmes pour les deux cartes 11 km² soit 6 % de la zone d'évaluation. Cet indice est invariable, il reflète la vulnérabilité des zones sans couverture protectrice.

Les deux cartes (A et B) seront utilisées pour le calcul de l'indice global de vulnérabilité, ceci afin de ne pas faire de choix a priori sur les critères de pondération retenus.

4. Paramètre I « Infiltration »

L'évaluation du paramètre I « Infiltration » est basée sur l'identification des surfaces qui favorisent une infiltration lente et diffuse, et la localisation des zones d'infiltration rapides et concentrées. Les critères permettant la définition de ce paramètre sont : la présence ou non de formes exo et endokarstiques, la pente et l'occupation du sol (figure 3.12).

4.1. Critère « Géomorphologie karstique »

Le calcaire bien que peu perméable et compact, à l'échelle de l'échantillon présente de nombreux plans de discontinuité qui constituent des zones de faiblesses empruntées par les eaux de ruissellement. Il résulte de cette circulation de fluide, un élargissement des plans de discontinuités primaires et une karstification de la roche encaissante donnant lieu à des formes exokarstiques variées. Selon le degré de karstification et le type de formes exokarstiques: lapiés, dolines ou avens, on note des modes d'infiltration concentrés ou diffus. La nature des formations géologiques et la fracturation influencent les circulations des eaux souterraines, la répartition, le type et l'importance des formes géomorphologiques.

La cartographie de la vulnérabilité des formes géomorphologiques ne se limite pas aux points d'absorption, mais englobe les bassins d'alimentation locaux de chaque point (exemple du gouffre de l'oued Tazmmourt). Cette démarche s'est effectuée en plusieurs étapes :

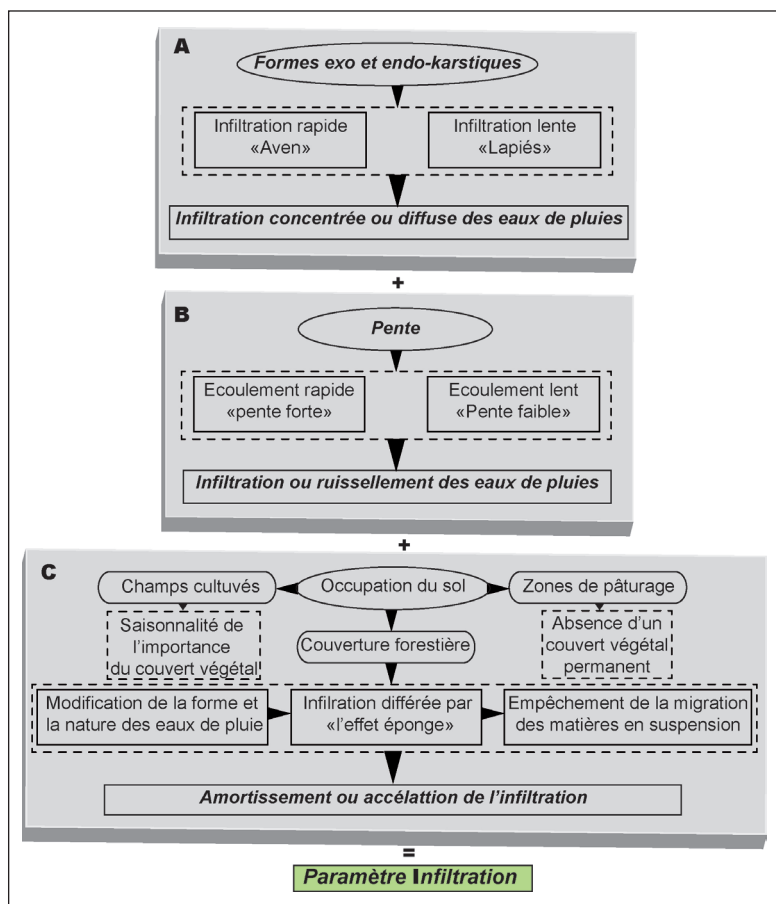


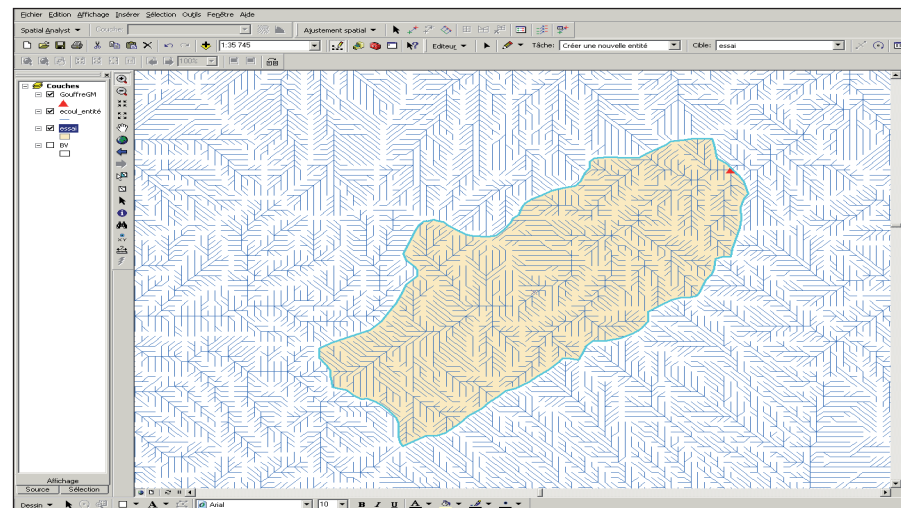
Figure 3.12 : Caractérisation des sous critères composant du paramètre infiltration.

- repérage et géoréférencement des formes exokarstiques sur le terrain ;
- projection des points relevés à l'aide d'un SIG (cf. figure 1.12) ;
- obtention à l'aide des outils MNT d'un réseau linéaire d'écoulement et de l'ordre d'écoulement de Strahler³ ;
- délimitation des bassins d'accumulation des formes karstiques (figure 3.13).

Tous les bassins d'alimentations des gouffres et des dolines sont vectorisés et indexés selon le degré de vulnérabilité des formes qui leur sont associées.

3. Méthode de la hiérarchisation des branches d'un réseau hydrographique. Elle est fondée sur l'importance croissante des branches, depuis les ramifications originelles jusqu'à la fin du collecteur principal.

Figure 3.13 : Délimitation du bassin d'alimentation d'une perte karstique. Cas de la perte de l'oued Tazmmourt.



Les classes de vulnérabilité des formes karstiques (exo et endokarstiques) se présentent de la manière suivante :

Tableau 3.5 : Evaluation du critère « géomorphologie karstique ».

Capacité d'infiltration	Indice de vulnérabilité
Lapiés	1
Dolines	2
Gouffres et pertes	3
Terrains non karstiques	4

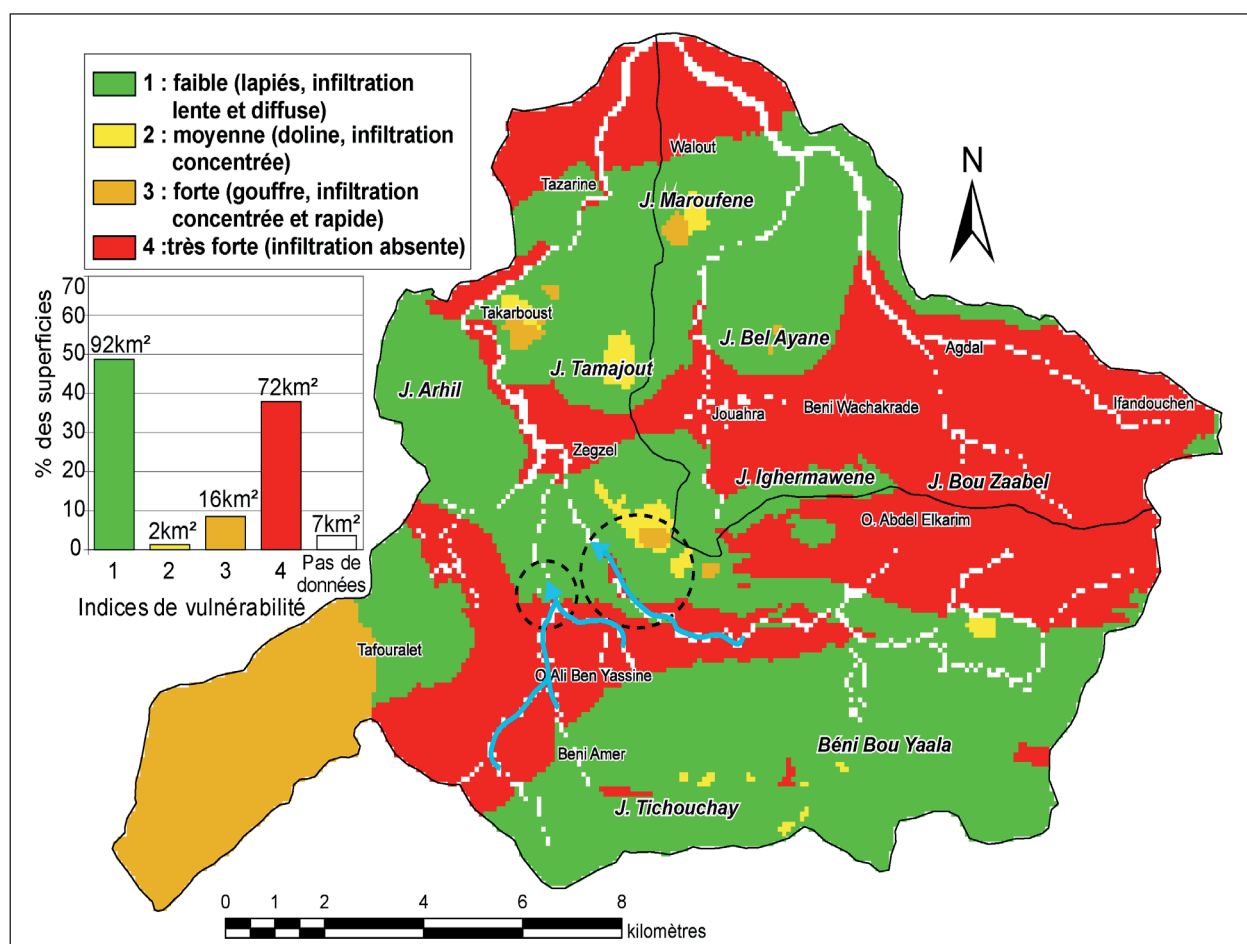
Source : (DOERFLIGER *et al.*, 1998)

L'application de cette indexation sur la zone d'étude permet d'obtenir la répartition spatiale de la vulnérabilité de l'infiltration et de la recharge des aquifères karstiques en fonction de la géomorphologie karstique. Quatre classes d'indices sont distinguées (figure 3.14) :

- **l'indice 1** représente les zones de *faible vulnérabilité*. Elles sont associées aux terrains lapiazés qui se caractérisent par une infiltration lente et diffuse. Les terrains non évalués dans ce paramètre présentent une superficie de 3 km² soit 6 % de l'ensemble de la zone d'étude ;
- **l'indice 2** comprend les zones de moyenne vulnérabilité correspondant aux bassins d'alimentation des dolines. Ces zones se caractérisent par un mode d'infiltration concentré. Ceci est dû à la collecte des eaux de ruissellement en un point localisé d'absorption. Bien que ces formes permettent l'alimentation des aquifères karstiques, l'infiltration des matières en suspension (MES) à travers le karst a une influence sur la qualité des eaux. Il est à noter que l'impact de l'infiltration (MES) dans les dolines est moins important par rapport aux gouffres. Ces derniers ont des points d'ouvertures plus grands, ce qui donne une capacité et une vitesse plus importante des eaux ruisselées et donc de transport des MES de l'impluvium jusqu'à l'exutoire. La superficie des zones de *moyenne vulnérabilité* est de 2 km² soit 1 % des deux bassins versants observés ;
- **l'indice 3** est attribué aux zones de forte vulnérabilité présentant les bassins d'alimentation des gouffres. L'indice de forte vulnérabilité est attribué à ces zones, dans la mesure où les gouffres favorisent une infiltration concentrée et rapide via un point d'absorption. Vu la

nature orageuse des précipitations, les eaux de pluie sont torrentielles et chargées (MES). Ce type d'alimentation des aquifères karstiques se reflète par une turbidité remarquable des eaux des sources pendant les averses violentes. Ceci engendre une dégradation de la qualité des eaux souterraines. Les zones de *forte vulnérabilité* ont une superficie équivalente à 16 km² soit 9 % de la zone d'étude ;

- **l'indice 4** correspond aux zones de très forte vulnérabilité dans lesquelles les terrains sont non karstiques, donc l'infiltration et l'alimentation des aquifères karstiques par ces terrains sont nulles. Ces terrains (schisteux argileux basaltiques et marneux) sont intégrés dans l'évaluation du critère « géomorphologie karstique » car ils permettent le ruissellement des eaux de pluie. Une partie de ces eaux peuvent se perdre au contact des zones de discontinuité calcaire. Les contacts lithologiques dans l'oued Moulay Idriss et Oued Ferrouj sont susceptibles d'être favorables à l'infiltration (zones en pointillés dans la figure 3.13). Lors de nos missions sur le terrain, des essais de localisation de points d'infiltration ont été tentés sans succès. Le manque d'écoulement permanent des oueds est un handicap pour l'identification de ces points. Les zones de très forte vulnérabilité présentent 72 km² soit 38 % de la superficie de la zone d'étude.



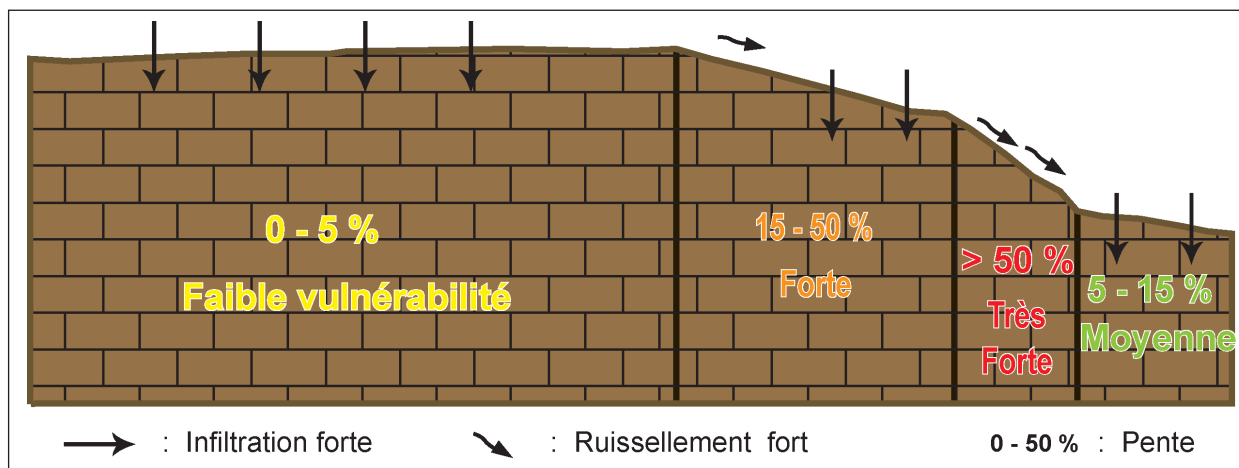
Les zones en pointillés correspondent aux points favorables à l'infiltration.

Figure 3.14 : Géomorphologie associée aux indices de vulnérabilité.

4.2. Critère « Pente »

La pente est un des paramètres primordiaux dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques par rapport à la recharge. En fonction de son importance, elle favorise soit l'infiltration soit le ruissellement des eaux de pluie (figure 3.15). Dans la classification du critère « Pente », il est important d'intégrer les aménagements anthropiques « terrasses agricoles » qui ont un rôle important à la fois sur la préservation du sol et l'infiltration (AUBERT, 1986) (figure 3.14). Par ces aménagements, l'homme a modifié la topographie du terrain. Ceci a une influence sur les modalités d'infiltration et/ou du ruissellement. Les terrasses agricoles sont mises en place à cause du manque notable de terres agricoles. Pour y remédier, les agriculteurs ont construit des terrasses pour valoriser le peu d'espace arable pouvant supporter des pratiques agricoles.

La cartographie des terrasses est effectuée en plusieurs étapes (annexe 14) : (i) digitalisation des terrasses à partir des photos aériennes en se basant sur Google Earth ; (ii) exportation des polygones digitalisés sur GE Path pour les convertir en format Excel (les formats obtenus par Google Earth ne sont pas reconnus par ArcGis) ; (iii) exportation ensuite sur ArcGis des données correspondantes aux terrasses, conversion des points Excel en polygones (étape qui doit s'effectuer pour chaque terrasses), vérifier la bonne projection et enfin croisement de la couche terrasses agricoles avec la carte des pentes.



Source : (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000)

Figure 3.15 : Relation pente, vulnérabilité en fonction de l'infiltration.

Les terrasses sont positionnées le long du cours principal de l'oued et concernent différentes formations géologiques. Elles épousent les variations topographiques. Leur édification s'est effectuée au cours des décennies essentiellement dans les formations schisteuses, basaltiques, marno-calcaires (photo 3.1.A). Sur les formations dures, la population a construit des murets de pierres (cas des Béni Amyr) qui suivent les contours géologiques (photo 3.1.B). La déprise rurale ne permet pas leur entretien total et il est fréquent de voir leur déstabilisation (cas de Quartass) photo 3.1.C.

A partir du modèle numérique de terrain SRTM 3 (MNT à 90 m environ), nous avons extrait les pentes qui ont été regroupées en 4 classes (tableau 3.6). Ce découpage respecte le classement appliqué par la méthode d'évaluation « RISKE » (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000).

La cartographie de la vulnérabilité d'infiltration en fonction des classes de pentes (figure 3.15), a permis d'obtenir différents intervalles. La superficie de quatre classes est variable, selon la topographie et les modifications de celles-ci par les actions anthropiques.



Photo 3.1 : Types de terrasses rencontrés dans les Béni Snassen.

Tableau 3.6 : Evaluation du critère pente.

Pente (%)	Indice de vulnérabilité
Faible pente < 5	1
Moyenne pente (5 - 15)	2
Forte pente (15 - 50)	3
Très forte pente >50	4

Source : (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000)

- **l'indice 1** correspond aux zones de faible vulnérabilité ce qui favorise l'infiltration et donc la recharge des aquifères karstiques. L'indice de faible vulnérabilité est attribué également aux terrasses agricoles. Ces zones présentent une superficie de 17 km² soit 9 % des deux bassins versants ;
- **l'indice 2** comprend les zones de *moyenne vulnérabilité* dans lesquelles la pente varie de 15 à 5 %. Ces zones occupent 33 km² (17 %) de l'ensemble de la zone d'étude ;
- **l'indice 3** représente les zones de *forte vulnérabilité* dans lesquelles la pente est comprise entre 50 et 15 %. Ces zones présentent 119 km² soit 63 % de la zone d'étude ;
- **l'indice 4** correspond aux zones de *très forte vulnérabilité* dans lesquelles la pente est supérieure à 50%. Ceci favorise le ruissellement des eaux de pluie et empêche l'infiltration des eaux via le karst. Cet indice correspond à 20 km² du terrain d'étude.

Les très fortes pentes (supérieures à 50%) et fortes pentes (entre 15 et 50 %) engendrent un important ruissellement des eaux issues des averses ce qui empêche l'infiltration et donne une augmentation des débits en favorisant l'arrachement et le transport des matières fines. Quand les pentes sont moyennes (entre 15 à 5 %) à faible (inférieure à 5 %) l'infiltration est favorisée au détriment du ruissellement.

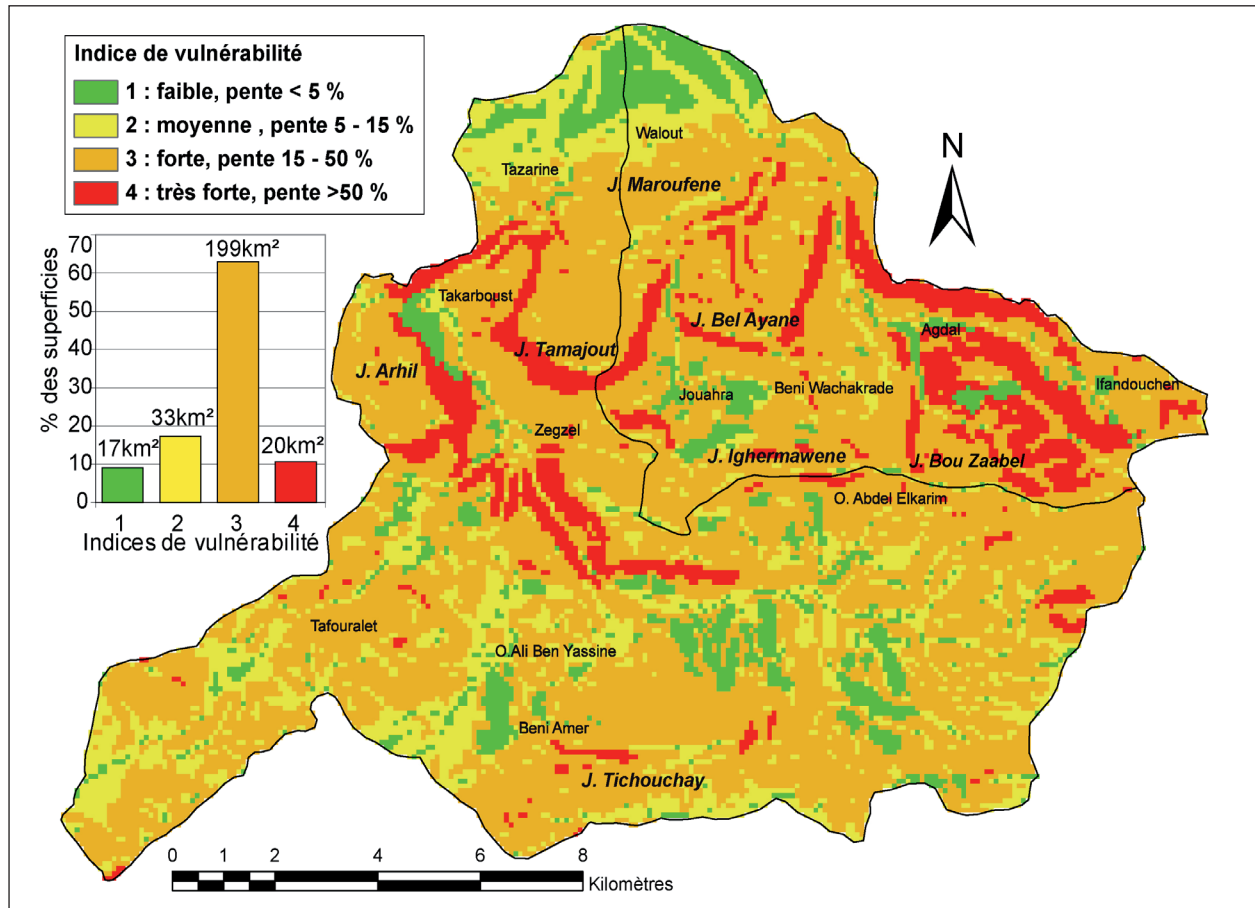


Figure 3.16 : Classes de pentes associées aux indices de vulnérabilité.

4. 3 Critère « occupation du sol »

L'objectif principal de l'évaluation de l'occupation du sol a pour objet d'appréhender essentiellement le rôle de la couverture végétale, associé aux activités anthropiques. Le but est d'apprécier son influence sur la dégradation et/ou au contraire le renforcement du système vulnérabilité des eaux karstiques. L'évaluation du critère « occupation du sol » nécessite le croisement de trois sous critères : forêt, champs cultivés et pâturages (photo 3.2).



Photo 3.2 : Composition de l'occupations du sol dans les Béni Snassen (Azrou Ourhil).

Sous critère « occupation du sol »

Le sous critère « couvert forestier » est important dans l'approche de l'évaluation de la vulnérabilité en fonction de la recharge des aquifères karstiques, dans la mesure où il constitue un écran protecteur entre les actions externes et le karst sous jacent. Il modifie la forme et la nature des eaux de pluie (souvent orageuses dans le terrain d'étude), prolonge la durée de l'arrosage et empêche la migration de matières en suspension (cf figure 3.10).

Pour montrer la répartition spatiale du couvert forestier, et son importance en tant que zone « tampon », nous l'avons subdivisée en différentes classes selon sa densité. La classification de ce paramètre est conditionnée par le détail livré dans la carte de végétation, utilisée comme document de base. La carte de la figure 3.15 présente la variabilité spatiale du rôle protecteur joué par le couvert forestier. La faiblesse locale de cette couverture (38 % de la superficie totale de la zone d'étude) influence l'infiltration. Seulement 5 % de la superficie des deux bassins versants présentent une densité du couvert forestier supérieure à 66 % (tableau 3.7). Celui-ci joue un rôle « d'éponge », limitant le ruissellement et permettant une infiltration lente et prolongée des eaux météoriques, mais à contrario augmentant l'évapotranspiration (BENCHETRIT, 1972).

	Zegzel	Béni Ouaklane	Total
Non boisé	41	32	38
Densité<10%	33	19	29
10%<densité<33%	14	16	15
33%<densité<66%	10	21	13
Densité>66%	2	12	5

(Direction régionale des Eaux et Forêts, 1997a; 1997b)

Tableau 3.7 : Répartition de la densité du couvert forestier dans les deux bassins versants (Zegzel et Béni Ouaklane).

Afin d'évaluer l'influence de l'importance du couvert forestier sur l'infiltration, nous avons attribué des indices de vulnérabilité à chaque classe de densité forestière. L'intégration de deux autres sous critères : « champs cultivés » et « zones de pâturages » s'avère importante. Ces deux pratiques ont des conséquences majeures sur la réparation, la nature et la densité du couvert végétal. Il est important de noter que dans la cartographie du critère « champs cultivés » nous n'avons pris en compte que les champs de néfliers, d'amandiers et d'oliviers (les champs qui présentent un couvert arbuste permanent). La présence de ces activités agricoles date de plusieurs générations, elles constituent un patrimoine culturel de la région. En ce qui concerne le sous critère « zones de pâturage », il correspond aux terrains nus qui se caractérisent par une grande saisonnalité de la présence ou non du tapis herbacé. L'irrégularité est intimement liée aux conditions climatiques (pendant la période estivale et les années sèches, le tapis herbacé est quasiment absent).

Les classes de différents sous critères d'occupation du sol sont récapitulées dans le tableau 3.8. Nous avons attribué à chacune de ces classes un indice de vulnérabilité. Cette classification est conditionnée par la précision de la carte de végétation utilisée comme document de référence. La carte utilisée regroupe la densité du couvert forestier en quatre classes. Ce découpage est maintenu dans l'évaluation du rôle de la forêt par rapport à la recharge des aquifères karstiques. Les champs cultivés et les terrains de pâturages sont intégrés également dans l'évaluation du critère « occupation du sol »

Tableau 3.8 : Evaluation du critère « occupation du sol ».

Occupation du sol		Indice de vulnérabilité
Forêt	Très forte densité >66%	0
	Forte densité (33-66%)	1
	Moyenne densité (10-33%)	2
	Faible densité <10%	3
Champs cultivés		3
Pâturages		4

Obtention de la carte occupation du sol

L'application des indices de vulnérabilité aux classes de l'occupation du sol a permis la spatialisation de la vulnérabilité en fonction de l'infiltration et la recharge des aquifères (figure 3.17). Cette carte sera croisée avec la carte des formes géomorphologiques et des pentes pour obtenir la carte I. A partir de cette carte, nous pouvons distinguer cinq indices de vulnérabilité :

- **l'indice 0** correspond aux zones de très faibles vulnérabilité dans lesquelles la densité du couvert forestier est supérieure à 66% ce qui favorise la préservation des sols et l'infiltration des eaux de pluie par le ralentissement d'un ruissellement torrentiel. Ces terrains présentent seulement 7 km² soit 4 % de la zone d'étude ;
- **l'indice 1** correspond aux zones de *faible vulnérabilité* dans lesquelles la densité du couvert forestier présente un intervalle entre 33% et 66%. Ces zones présentent une superficie de 25 km² soit 13 % des deux bassins versants. Dans cette classe, le couvert forestier assez dense joue son rôle « d'éponge » limitant le ruissellement et permettant une infiltration lente et prolongée des eaux de pluie ;
- **l'indice 2** représente les zones de *moyenne vulnérabilité* dans lesquelles la densité du couvert forestier varie de 10 à 33 %. Ces terrains présentent 27 km² ;
- **l'indice 3** comprend les zones de *forte vulnérabilité*. Cet indice comprend à la fois les zones dans lesquelles la densité du couvert forestier est inférieure de 10 % et les champs cultivés. la figure 3.17 montre que 75 km² soit 40 % de l'ensemble des deux bassins versants présente des surfaces de *forte vulnérabilité*. La faible densité du couvert végétal, fait que celui-ci ne joue que partiellement son rôle « tampon » entre le karst et les actions externes, afin de permettre une infiltration diffuse ;
- **l'indice 4** correspond aux zones de très forte vulnérabilité qui présentent les terrains nus pâturés. Les zones de pâturages occupent 55 km², soit 31 % de la zone d'étude. Celles-ci sont mises à nu, le couvert végétal absent ne joue pas son rôle protecteur.

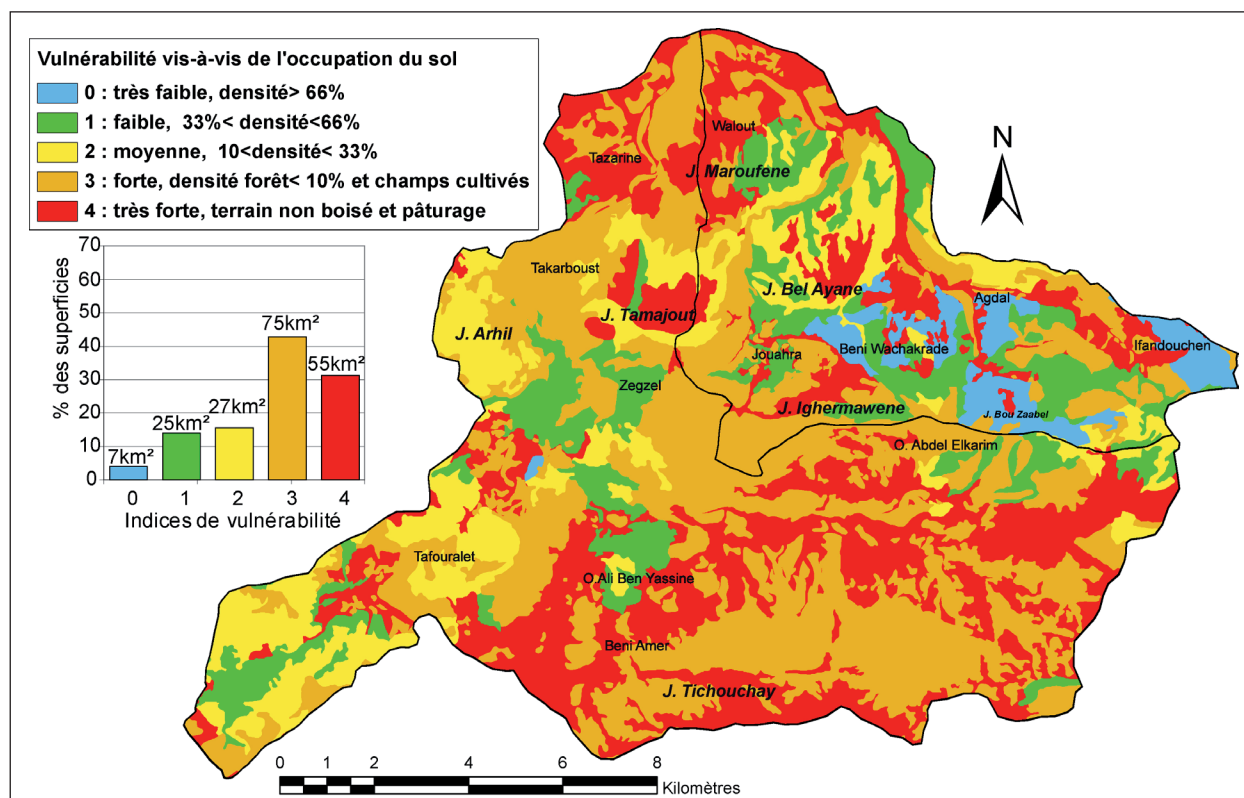


Figure 3.17 : Carte d'occupation du sol associée aux indices de vulnérabilité.

Obtention de la carte I « Infiltration »

Afin de pouvoir croiser les trois paramètres d'évaluation de la vulnérabilité du critère I : « géomorphologie karstique », « pente » et « occupation du sol », il est nécessaire d'attribuer à chaque couche d'information un facteur de pondération. Pour le croisement de trois cartes du paramètre infiltration, nous avons superposé les différentes couches d'informations en testant différents poids d'importance pour chaque sous critère (figure 3.18). Cette opération est réalisée à l'aide de l'utilisation de l'outil SIG.

Dans un premier temps, nous considérons que les trois couches d'informations ont le même poids de pondération (figure 3.18 A) ;

Dans un deuxième temps, nous considérons que les formes géomorphologiques ont un poids deux fois plus important que la pente et l'occupation du sol (qui présente le même poids de pondération). Ce choix a été appliqué dans la mesure où les formes géomorphologiques karstiques constituent les points privilégiés d'infiltration (figure 3.18 B). L'objectif de cette démarche est de faire des tests sur l'importance du poids de chaque couche d'information, afin de mettre l'accent sur l'influence des paramètres contrôlant l'évaluation de la vulnérabilité en fonction de l'infiltration.

La figure 3.19, présente le résultat de la spatialisation de l'indice de vulnérabilité du paramètre « infiltration ». Bien que le poids de pondération des différents paramètres soit variable pour les deux cartes présentant la vulnérabilité en fonction de l'infiltration, les zones correspondant aux bassins d'alimentation des formes géomorphologiques s'individualisent clairement comme zones de *forte à moyenne vulnérabilité* (en orange et en jaune). Ces zones sont associées à un processus d'infiltration concentré et rapide. La **carte B** illustre l'atténuation de la vulnérabilité. Lorsque les surfaces d'infiltration à faible pente (inférieure à 5 %) se croisent avec des surfaces lapiazées couvertes par une végétation faiblement dense (10 %), la vulnérabilité moyenne de la **carte A** passe à une vulnérabilité faible dans la carte B, (cas des Béni Bou Yaala). Ces zones correspondent

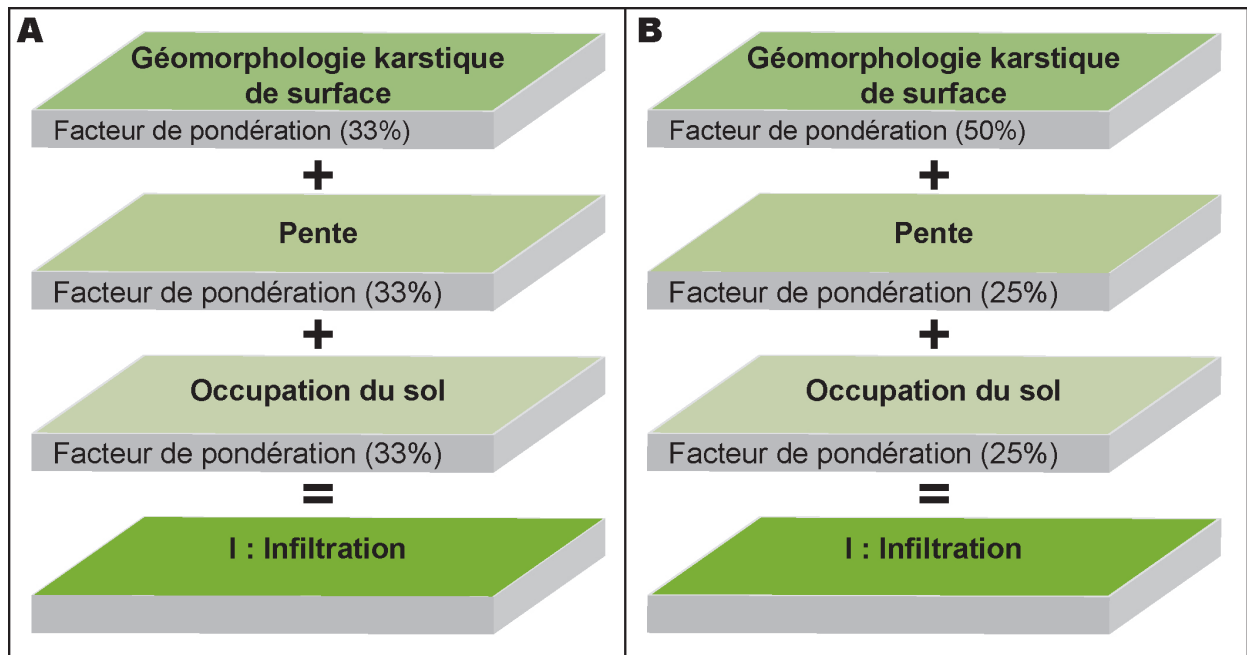
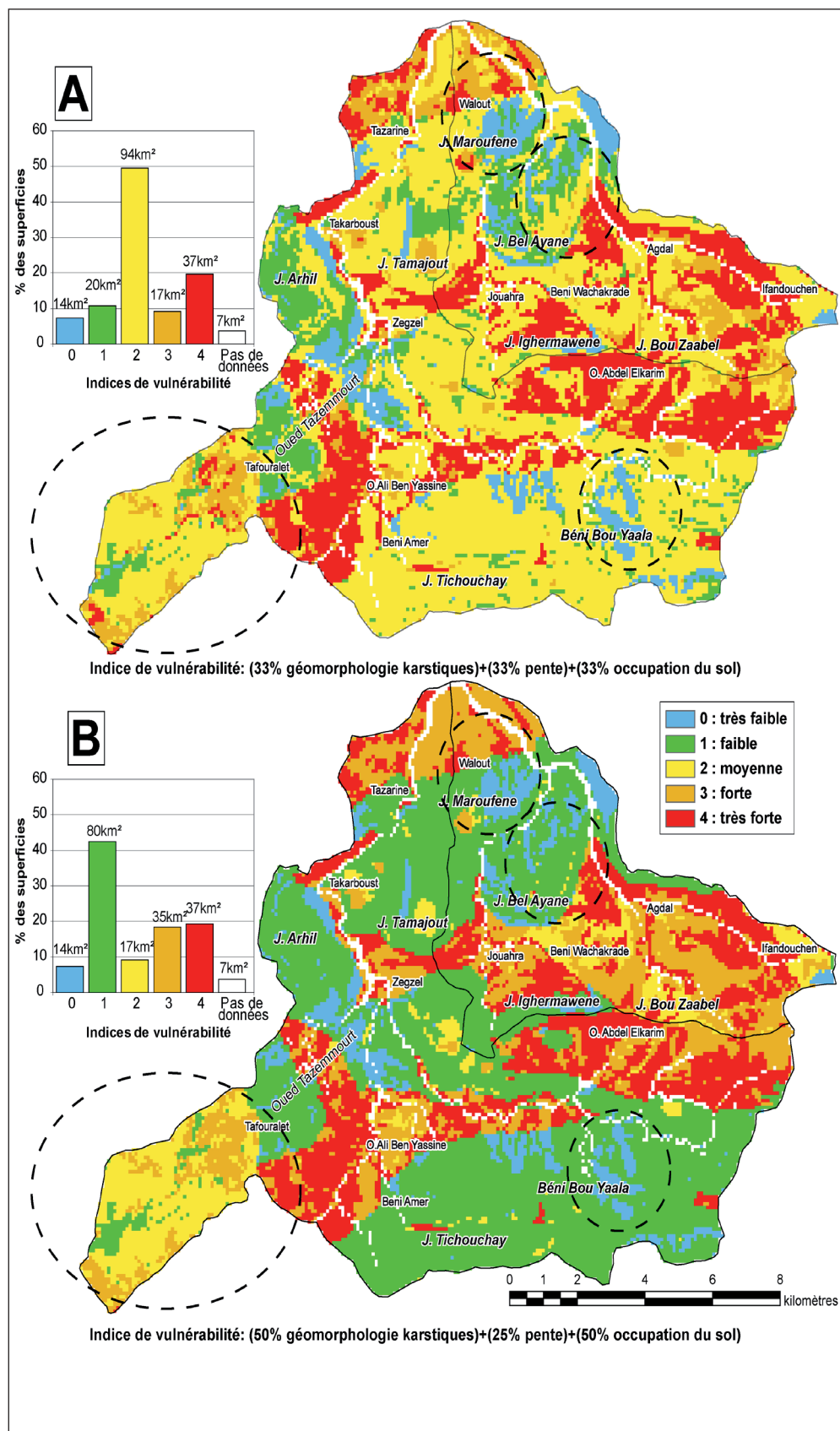


Figure 3.18 : Superposition des paramètres d'évaluation du critère « Infiltration ».

à des surfaces intermédiaires d'infiltration diffuses à pente faible avec influence de morphologies karstiques de surface type lapiés. Dans d'autres cas de figures, le couvert forestier contrôle le degré de la vulnérabilité du paramètre infiltration : par son *atténuation* (cas du versant est de jbel Maroufène dans lequel la densité du couvert végétal varie de 33 à 66 % sur un terrain lapiazé à pente forte (entre 15 à 50 %)) ; l'indice de vulnérabilité passe de *moyen* dans la carte A, à *faible* dans la carte B. A contrario, l'absence de couvert végétal, dans certains cas, peut *accroître* le degré d'indice de vulnérabilité (cas du versant est du jbel Bel Ayane), **la carte A** présente un indice de vulnérabilité *très fort* à cause de l'absence de couvert végétal et la présence d'une pente forte (entre 15 à 50 %) à très forte (supérieure à 50%) ; ces conditions favorisent le ruissellement malgré l'existence d'un terrain lapiazé. **La carte B**, présente une baisse de l'indice de vulnérabilité, les zones de *forte vulnérabilité* passent à *moyenne vulnérabilité*. Ceci est dû à l'importance du poids accordé aux lapiés qui sont considérées comme points d'infiltration lente et diffuse. Pour les deux cartes, le degré de vulnérabilité, associé aux bassins d'alimentations des gouffres et des dolines, peut connaître une certaine atténuation. Pour illustrer ceci, nous prenons le bassin d'alimentation de la perte karstique au fond de l'oued Tazemmourt, il se présente comme une entité de *moyenne vulnérabilité* à l'exception des zones présentant à la fois une densité forestière supérieure à 66 % et une pente faible inférieure à 5 % (en vert), ces deux critères permettant d'atténuer la vulnérabilité.



Les zones en pointillés correspondent aux zones commentées dans le texte

Figure 3.19 : Indice de vulnérabilité du paramètre « Infiltration », selon le facteur de pondération de sous critère « formes géomorphologiques », « pente » et « occupation du sol ».

Ces zones favorisent localement, une infiltration diffuse et lente. En revanche, les zones non boisées présentent un indice de vulnérabilité *fort*. Dans la carte A, la même entité présente une vulnérabilité allant de *très forte* à *très faible*. Cette variabilité est liée au croisement des formes géomorphologiques avec l'occupation du sol (densité du couvert forestier et activités anthropiques) et la topographie du terrain pour déterminer les modes d'infiltration avec le même facteur de pondération.

La superficie des zones de *faible* et *très forte* vulnérabilité est la même (14 km² et 37 km² respectivement) pour les deux cartes proposées.

Cette réflexion, met l'accent sur l'apport de l'intégration des critères « occupation du sol » et « pente » dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques. Les critères « champs cultivés » et « pâturages » ont été souvent négligés dans de nombreuses méthodes abordant ce sujet : RISKE (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000), COP (VIAS, 2006).

Il est important de souligner, qu'à ce stade, l'objectif n'est de ne pas de faire un choix entre les cartes obtenues, mais de (i) montrer la différence de la répartition spatiale du degré de la vulnérabilité en fonction du poids attribué à chaque critère, et de (ii) mettre le doigt sur l'importance de croiser les trois paramètres « géomorphologie karstique », « pente » et « occupation du sol », facteurs intervenant dans le contrôle de l'infiltration. Ces deux cartes seront exploitées dans le chapitre quatre pour obtenir les cartes globales de la vulnérabilité.

5. Paramètre L « Lithologie »

Bien que la lithologie constitue le principal élément d'évaluation de la vulnérabilité dans le paramètre « L », l'indexation des indices de la vulnérabilité ne doit pas s'établir uniquement à partir de la carte géologique. Du point de vue litho-structural, les zones d'infiltration dépendent de plusieurs facteurs : (i) la nature lithologique, (ii) les accidents tectoniques majeurs, (iii) l'épaisseur des strates et (iv) leurs pendages. Ces éléments caractérisent la vitesse d'infiltration, influencent également la structuration du karst interne soit en facilitant la circulation, soit en les contrariant (DELANNOY, 1997). D'où la nécessité de distinguer les types d'infiltration de chaque formation lithologique.

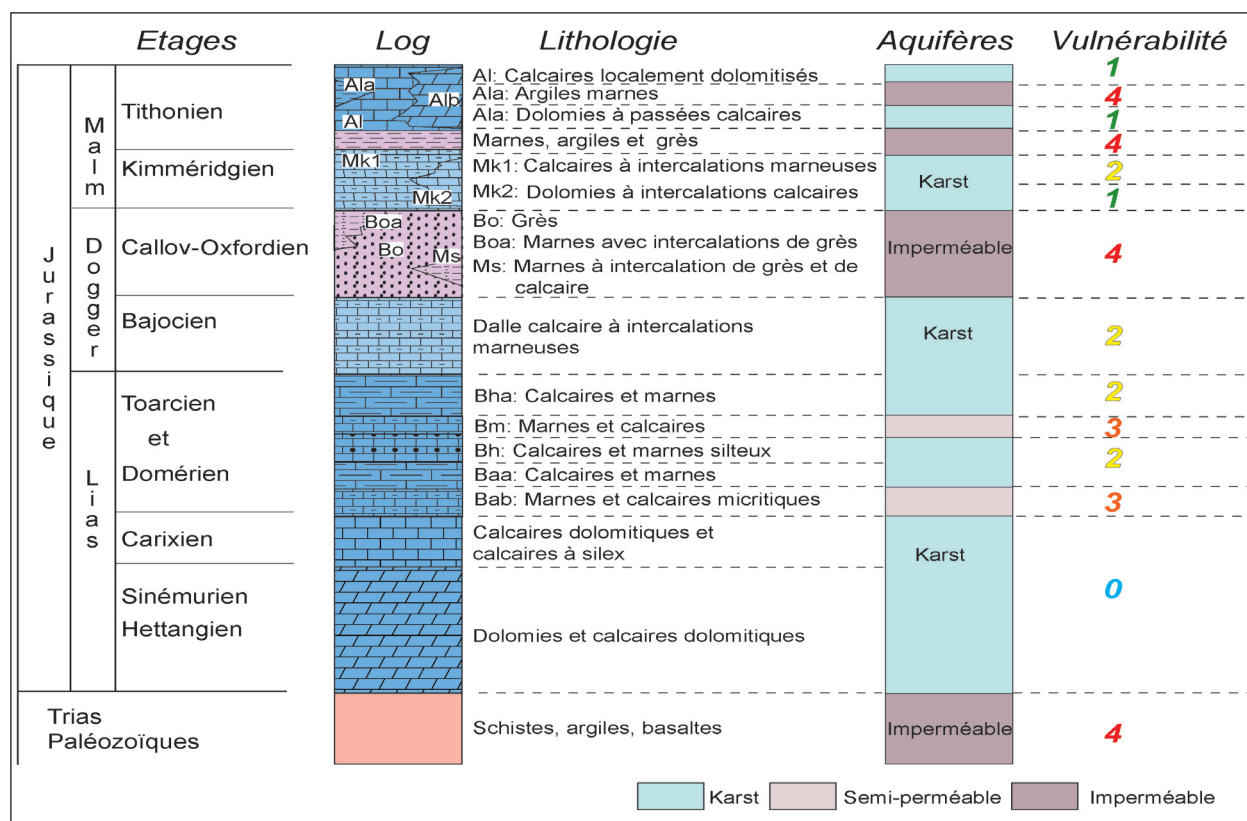
L'évaluation du paramètre « Lithologie » est donc indispensable dans cette approche qui vise à déterminer la vulnérabilité en fonction de la recharge des aquifères karstiques. La première étape dans la réalisation de ce travail, est la vectorisation de la lithologie de la zone d'étude à partir des cartes géologiques au 1/50 000 de Berkane est Ahfir (Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie, 2001; 2004). La cartographie a été complétée par des missions de terrain.

Pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques, les formations géologiques peuvent être divisées en deux grandes unités :

1. Les terrains non karstifiables (schisteux, argileux, basaltiques et marneux) qui empêchent l'infiltration et favorisent le ruissellement. Ces terrains présentent une *vulnérabilité très forte*. Ils sont intégrés dans le système « évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques » car ils permettent le développement d'un réseau hydrographique dense. Pendant les hautes eaux, une partie des eaux drainées se perdent via les pertes ou les plans de discontinuité litho-structuraux des formations carbonatées.
2. Les terrains karstifiables (dolomies, calcaires, marno-calcaires) influencent, par leurs caractères litho-structuraux (porosité, degré d'insoluble, fissuration...), le développement d'un système de drainage karstique et donc l'infiltration des eaux de pluie à travers le karst. Il est délicat de généraliser l'évaluation de la vulnérabilité de cet ensemble. Pour mener à bien cette étude, il est important d'attribuer des indices de vulnérabilité à chaque formation

lithologique selon ces caractéristiques.

La figure 3.20 récapitulative des classes de la vulnérabilité du paramètre L « Lithologie » révèle l'existence de 5 classes dans lesquelles nous avons attribué des indices de vulnérabilité.



Source : (PETELET-GIRAUD., *et al* 2000 ; Ministère de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie, 2001; 2004)

Figure 3.20 : Echelle stratigraphique simplifiée associée aux indexations de la vulnérabilité vis-à-vis de la lithologie.

Les faibles indices traduisent une influence faible vis-à-vis de la vulnérabilité en fonction de l'infiltration, par contre, les indices forts traduisent une forte influence sur celle-ci.

Sur le terrain, nous avons repéré les assises karstifiées (photo 3.3), ce qui témoigne de l'existence d'une circulation souterraine. Les terrains karstifiés correspondent aux dolomies, aux calcaires dolomitiques du Sinémurien et de l'Hettangien et aux calcaires du Carixien. Ces roches sont également intensément fracturées. La forte fracturation et karstification des roches calcaires et dolomitiques favorise leur indexation comme terrains à *très faible vulnérabilité*.

La figure 3.21 montre que l'ensemble du massif des Beni Snassen est affecté par un système principal de failles d'orientation ENE-WSW et deux systèmes secondaires NNW-SSE et NW-SE (NACIRI, 1986).

L'épaisseur des formations fortement karstifiées (dolomites et calcaires dolomitiques du Sinémurien et d'Hettangien, calcaires du Carixien) est spatialement variable, mais reste généralement importante. Par exemple les assises liasiques sont supérieures à 50 m (versant nord de Tamjout), elles peuvent atteindre 250 m (NACIRI 1986) à Béni Bou Yaala. En ce qui concerne les assises calcaires du Carixien, l'épaisseur varie de 50 à 200 m (NACIRI 1986) (cf. figure 1.3).

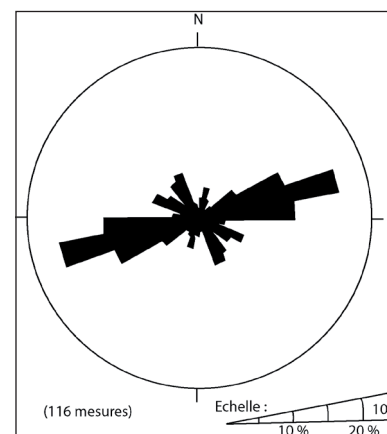
La zone comprend également des formations calcaires et marno-calcaires du Domérien, qui sont localisées dans les Béni Amyr et Trasrhout. Leur caractère lité favorise une infiltration diffuse dans la tranche supérieure des formations, tandis que les strates marneuses permettent



Photo 3.3 : Illustration sur le terrain des fractures (pointillés) et karstifications (flèches) des assises calcaires Carixien, Sinémurien et Hettangien.

Figure 3.21 : Rosaces de fréquences des directions de fracturation dans le massif des Béni Snassen.

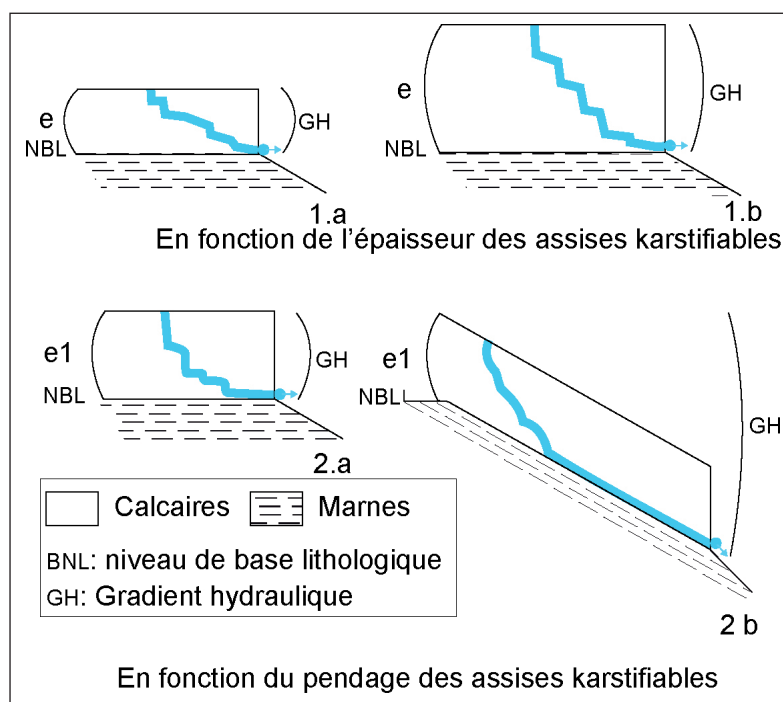
Source : (NACIRI, 1986)



le ruissellement. Cet ensemble Domérien est constitué dans sa base de séries à dominante de bancs calcaires d'une épaisseur moyenne de moins d'un mètre (NACIRI, 1986). Ces séries sont surmontées par une alternance régulière de calcaires et de marnes. Ces dernières se caractérisent par une épaisseur réglée en bancs de 5 à 15 cm. L'ensemble dépasse rarement les 20 m (NACIRI, 1986). Les séquences de cet ensemble n'ont pas le même comportement vis-à-vis des processus d'infiltration. L'existence de nombreux lits marneux va engendrer une certaine « résistance » du milieu vis-à-vis de la structuration du drainage endokarstique et par conséquent sur l'infiltration des eaux.

En ce qui concerne le paramètre pendage, les formations hettangiennes, sinémuriennes, carixiennes, domériennes et toarciennes ont un pendage moyen de 20°N sur le flanc nord des Béné Snassen orientaux (NACIRI, 1986). Cette caractéristique permet, en partie, le développement d'un gradient hydraulique important, ce qui facilite le cheminement des eaux météoriques de l'impluvium jusqu'à l'exutoire (figure 3.22).

Figure 3.22 : Incidences du contexte litho-structural sur la puissance du gradient hydrauliques.



Source : (DELANNOY, 1997)

Dans les formations callovo-oxfordiennes, les niveaux marneux non karstifiables sont assez développés ; le ruissellement de surface et de sub-surface y est donc favorisé. L'épaisseur de cet ensemble est importante (supérieure à 500 m).

Les formations kimméridgiennes et tithoniennes présentent des assises karstifiées (dolomies, calcaires), à l'exception des niveaux non perméables constitués de marnes, argiles et grès tithoniens.

5.1. Obtention de la carte L « Lithologie »

La figure 3.23, présente la répartition spatiale de la vulnérabilité vis-à-vis de la lithologie. Cinq indices de vulnérabilité sont obtenus :

- **l'indice 0** correspond aux formations de *très faible vulnérabilité*. Cet indice est attribué aux formations géologiques dolomitiques et calcaréo-dolomitiques karstifiées et fracturées possédant une épaisseur importante (qui peut atteindre 250 m pour les assises liasiennes), et un pendage moyen de 20° N, ce qui permet le développement d'un gradient hydraulique important. Ces conditions favorisent la pénétration des eaux de pluie, et par conséquent l'alimentation des aquifères karstiques. Ces formations présentent 50 % des terrains évalués (soit 89 km²) ;
- **l'indice 1** correspond aux formations de *faible vulnérabilité*. Ces couches correspondent aux assises calcaires localement dolomitiques et aux dolomites à intercalations calcaires du Kimméridgien et Toarcien. Elles sont faiblement fracturées avec une épaisseur d'environ 200 m. Ces formations présentent 4 % de la zone d'étude soit 7 km² ;

- **l'indice 2** correspond aux formations de *moyenne vulnérabilité*. Cette classe regroupe les formations calcaires à intercalations marneuses du Domérien, Toarcien, Bajocien et Kimméridgien. D'après l'aspect lithologique de ces couches, l'infiltration des eaux est moyennement ralentie. Ces indices correspondent à un pourcentage de 15 %, soit 26 km² ;
- **l'indice 3** correspond aux formations de *forte vulnérabilité*. Sur le terrain ces zones représentent les formations marno-calcaires du Domérien et du Toarcien. Ces indices présentent seulement 2 % de terrains concernés, soit 3 km². L'infiltration au sein de ces roches est faible à cause de la dominance des marnes.
- **l'indice 4** correspond aux formations de *très forte vulnérabilité*. Ces formations sont constituées de couches imperméables : schistes, argiles, basaltes, marnes... Ces assises sont constituées essentiellement de formations imperméables. L'infiltration supposée des eaux susceptibles d'alimenter les aquifères karstiques dans ces terrains est nulle. La superficie de ces terrains occupe le deuxième rang d'importance (après les zones à très faible vulnérabilité) avec 29 % de la superficie totale des terrains évalués, soit 52 km².

Les terrains non évalués présentent 6 % de la zone d'étude, soit 12 km². Ces terrains correspondent aux formations superficielles. Le manque d'information sur la nature des formations lithologiques sur lesquelles elles reposent a constitué un handicap dans l'évaluation de ces zones. Les formations superficielles sont évaluées dans le paramètre « couverture protectrice ».

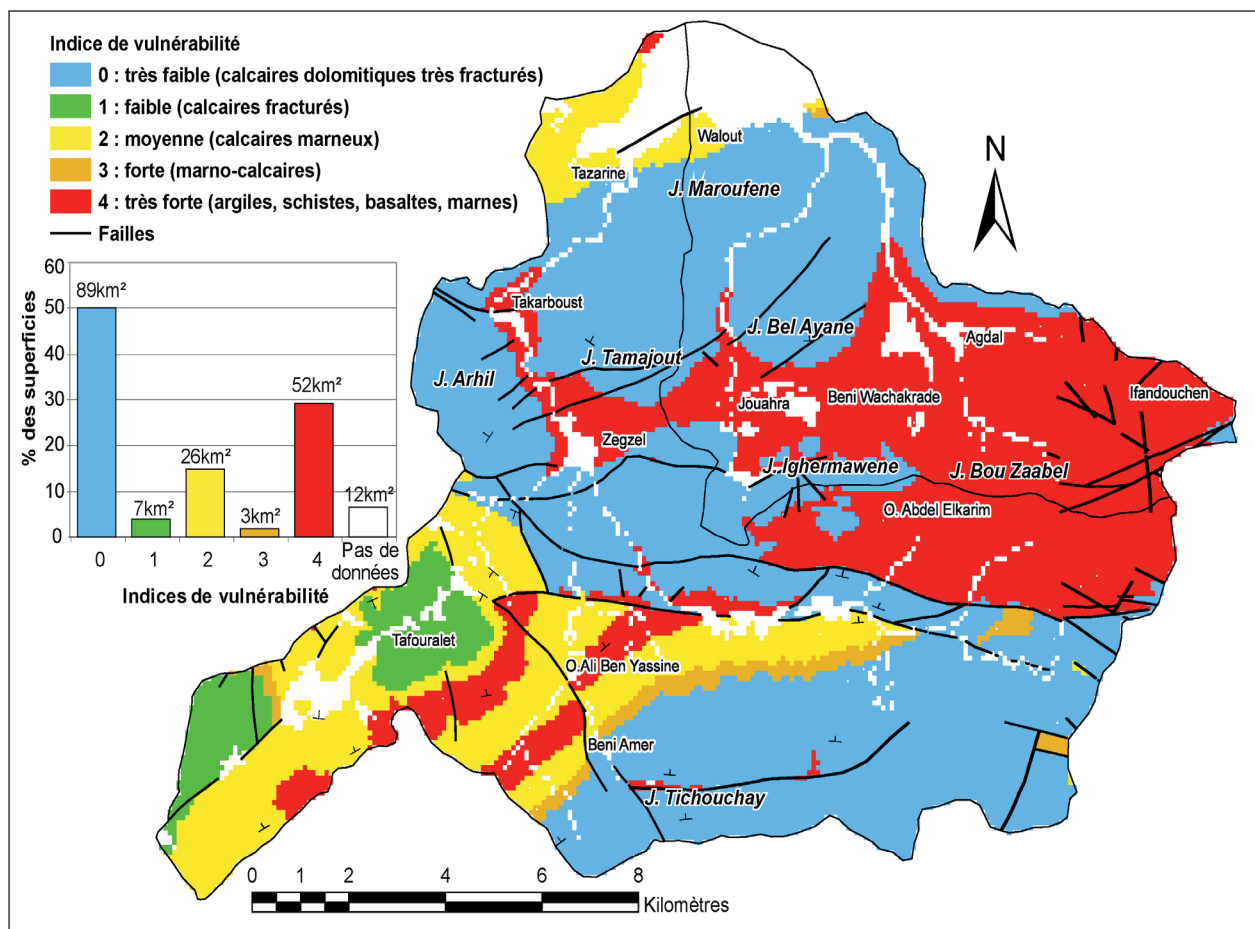


Figure 3.23 : Carte de la vulnérabilité en fonction de la lithologie

La répartition spatiale du paramètre « lithologie » entre en interaction avec d'autres paramètres du système et notamment le paramètre infiltration. Il guide en partie la répartition et la nature des formes karstiques, joue également un rôle sur la nature des couches pédologiques. L'agencement spatial du paramètre « lithologie » avec les autres intervenants dans la vulnérabilité des eaux karstiques contrôlera la répartition spatiale de vulnérabilité globale.

6. Paramètre « Développement karstique ou karstification »

La karstification du milieu est l'un des paramètres les plus importants qui conditionnent la vulnérabilité. C'est aussi un des paramètres les plus difficiles à appréhender. Il permet de caractériser la vulnérabilité d'un milieu souterrain.

La vulnérabilité est évaluée en fonction de la présence ou non d'un réseau karstique, et le degré de développement de ce réseau. Afin d'apprécier l'organisation du réseau karstique, les méthodes développées dans ce domaine s'appuient sur différents indicateurs :

- 1 - Une première indication est l'identification directe d'éléments d'un réseau karstiques, tels que les puits verticaux, les réseaux spéléologiques actifs, la présence de nombreuses sources et de grottes ;
- 2 - Une deuxième indication est l'identification indirecte. Celle-ci se base sur les analyses des hydrogrammes de crue, l'interprétation des essais de traçage et l'examen de la variabilité de la qualité de l'eau.

Il est important de souligner, que dans le cadre de ce travail, nous ne disposons pas d'informations concernant l'organisation et le fonctionnement du réseau souterrain : données concernant les informations spéléologiques (limites des bassins d'alimentation karstiques) et données hydrochimiques et bactériologiques sur au minimum un cycle annuel entier. Celles-ci permettent d'estimer le temps de réaction de la source aux événements pluvieux, la variation de la qualité des eaux en relation avec les précipitations et la vitesse moyenne de transit, calculée à partir d'un essai de traçage.

Pour l'évaluation du périmètre « K », en fonction de la recharge des aquifères karstiques, et à cause du caractère lacunaire de l'approche « karstification », nous avons défini des régions préférentielles de développement du réseau karstique d'un périmètre de 500 m autour des indices directs de la karstification souterraine (gouffres, grottes et sources karstiques). Ce choix reste arbitraire et peut être modifié dans les futures études.

Ici, le paramètre « karstification » est indexé par trois indices, du moins vulnérable au plus vulnérable :

Tableau 3.9 : Evaluation du critère karstification souterraine.

<i>Karstification souterraine</i>	<i>Indice de vulnérabilité</i>
Karstification souterraine développée (gouffres, grottes, sources)	1
Karstification souterraine supposée	2
Karstification souterraine absente	4

Source : Source : (DOERFLIGER *et al.*, 1998), modifié

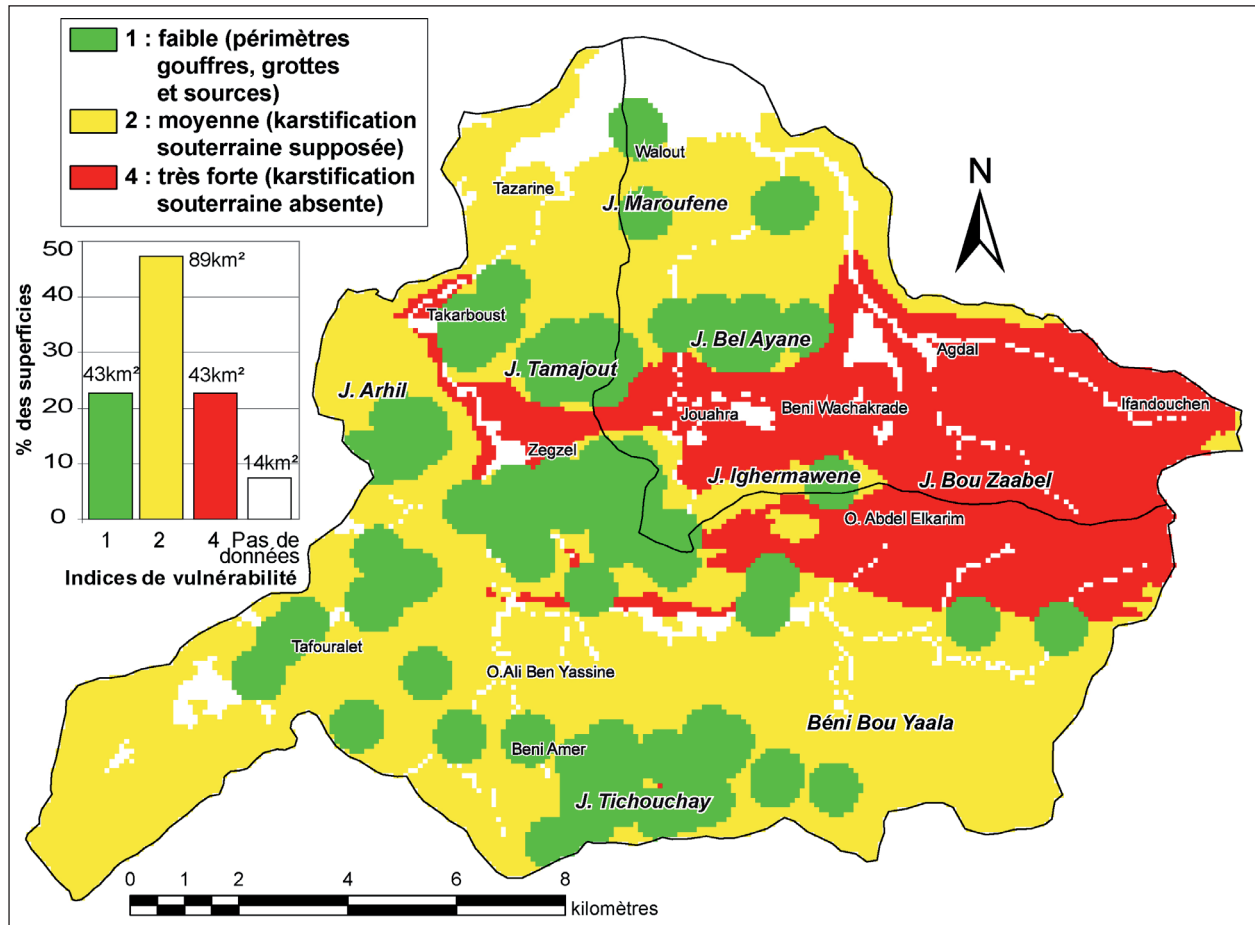


Figure 3.24 : Vulnérabilité à l'infiltration en fonction de la karstification souterraine.

La figure 3.24, présente la répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction de la karstification souterraine, il est à noter que l'évaluation de ce paramètre est une tâche délicate à cause du manque de données sur le fonctionnement et le comportement des eaux souterraines. La carte présente les trois indices de vulnérabilité suivants :

- **l'indice 1** est attribué aux périmètres de 500 m autour des gouffres, des grottes et des sources karstiques. On suppose que ces zones sont connectées à des réseaux karstiques bien développés et permettent l'infiltration et par conséquent l'alimentation de la recharge des aquifères karstiques. La structure développée et organisée du karst interne favorise l'infiltration et le transit des eaux de pluie de l'impluvium jusqu'à l'exutoire. Les drains karstiques bien structurés, facilitent également le cheminement des matières fines en suspension lors des averses violentes. Par ce biais ces zones correspondent à une *faible vulnérabilité*. Elles présentent 43 km² soit 23 % de la zone d'étude ;
- **l'indice 2** présente les zones de *moyenne vulnérabilité* associées aux terrains karstifiés (les terrains calcaires, dolomitiques et marno-calcaires) qui sont susceptibles de contenir des réseaux karstiques peu développés ou mal connectés avec la surface. Ces terrains présentent 89 km², soit 47 % de la zone évaluée ;
- **l'indice 4** comprend les zones dans lesquelles la karstification souterraine est absente, ces terrains ne contiennent aucun réseau souterrain pour alimenter les aquifères karstiques. Les substrats non karstiques sont intégrés dans la mesure où elles alimentent les terrains

karstifiés par un réseau hydrographique dense. Une partie des eaux ruisselées est susceptible de se perdre en contact avec les plans de contact lithologique (terrains imperméables/terrains perméables). L'indice 4 couvre 43 km² soit 23 % de la zone d'étude.

14 km² correspondent aux terrains non évalués à cause du manque de données.

Conclusion

Le Système d'Information Géographique (SIG) a été construit afin de pouvoir spatialiser et croiser les paramètres intervenant dans la dégradation et la protection des ressources en eaux karstiques dans un milieu méditerranéen semi-aride. Ces paramètres sont au nombre de cinq (i) *les Précipitations* (fréquence et intensité pluviométrique) ; (ii) *couverture Protectrice* (perméabilité et épaisseur) ; (iii) *Infiltration* (géomorphologie, pente et occupation du sol) ; (iv) *Lithologie* et (v) *Karstification* souterraine. L'évaluation de la vulnérabilité a été réalisée grâce au développement d'une nouvelle méthode multicritère « PPILK ». Cette méthode d'évaluation est adaptée au milieu méditerranéen semi-aride, contrairement aux autres méthodes existantes (EPIK, RISK, etc.).

Le SIG constitue un outil puissant et indispensable dans notre approche à caractère interdisciplinaire. Il permet d'abord d'assembler des données acquises de sources différentes (bibliographie, terrain, laboratoire), d'interroger, superposer, croiser, pondérer les couches d'informations stockées. La pertinence de l'utilisation d'un SIG, dans d'une problématique complexe d'aide à la décision (vulnérabilité, protection et gestion des ressources en eau dans un milieu semi aride), réside dans sa capacité à mettre en avant, à exploiter des données diverses et à les présenter sous forme de cartes rassemblant l'interaction de plusieurs facteurs.

La spatialisation des cinq paramètres a permis de montrer que les aires de vulnérabilité des eaux karstiques sont variables d'un paramètre à un autre. En outre, les critères et les sous critères de chaque paramètre rencontrés à l'impluvium peuvent jouer un rôle sur l'amplification de la vulnérabilité en fonction de la recharge karstique en favorisant le ruissellement, comme ils peuvent aussi réduire la vulnérabilité en favorisant l'infiltration.

Le SIG permettra également d'appréhender la vulnérabilité globale du milieu et son influence sur les ressources en eau souterraines. Ceci fera l'objet du chapitre quatre.

CHAPITRE 4

ANALYSE SPATIALE DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES. TESTS DES FACTEURS DE PONDÉRATION DES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION SELON LA MÉTHODE « PPILK »

Les cartes de vulnérabilité globale de la zone d'étude résultent d'une combinaison de plusieurs facteurs : (*Précipitations*, couverture *Protectrice*, *Infiltrations*, *Lithologie* et *Karstification*). L'objectif de ce chapitre est de croiser, superposer et pondérer les cartes obtenues de chacun de ces paramètres et de tester différentes combinaisons en fonction des poids attribués à chaque paramètre. L'objectif de cette démarche est donc de présenter la répartition spatiale de chaque combinaison, de discuter des facteurs contrôlant la distribution spatiale de la vulnérabilité et de mettre l'accent sur les conditions de la localisation et de l'extension de chaque aire de vulnérabilité. Les documents cartographiques obtenus font ressortir les zones vulnérables et procurent ainsi aux responsables de l'aménagement du territoire et aux acteurs chargés de la protection de l'environnement des supports pouvant servir à l'élaboration de mesures appropriées aux zones vulnérables à l'infiltration. Les cartes de vulnérabilité globale ont pour but d'illustrer les différents niveaux de vulnérabilité des eaux souterraines à travers la construction d'un SIG. Il est important de noter que dans le présent travail, la vulnérabilité consiste à évaluer l'infiltration des eaux de pluie et l'alimentation des aquifères karstiques. La qualité des eaux n'est pas prise en compte.

L'idée de mener une étude comparative de la répartition spatiale en fonction de l'importance du poids accordé à chaque paramètre s'est imposée suite à l'analyse des méthodes qui existent. Malgré les avantages de certaines des méthodes d'évaluation, leur facilité de mise en oeuvre et le report cartographique qu'elles livrent grâce aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), des difficultés apparaissent dans leur élaboration. La principale vient de l'attribution des paramètres, de leur notation et de leur poids. En effet, chaque étude étant différente, un paramètre important dans une étude peut ne pas apparaître dans une autre. De plus, lorsque le nombre de paramètres est élevé, il est possible qu'un paramètre primordial soit masqué par les autres paramètres. Ce constat impose les questions suivantes :

Existe-t-il une répartition spatiale de la vulnérabilité d'un paramètre à un autre ? Comment appréhender l'importance du poids de chacun des paramètres dans la répartition spatiale de la vulnérabilité ? Pour mieux évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines, quel est le poids de chaque paramètre dans la vulnérabilité en fonction de la recharge ?

Pour répondre à de telles questions, il est nécessaire de construire une méthodologie concertée qui intègre tous les éléments clés. La proposition de plusieurs tests de la répartition spatiale de la vulnérabilité est importante, afin d'apprécier la variation spatiale d'un test à un autre et de rendre compte du rôle joué de chaque paramètre dans la définition des aires de vulnérabilité, leur localisation, ainsi que leur degré.

L'objectif de ce travail est de contribuer à établir un outil d'aide à la décision pour la protection et la gestion des ressources en eaux. Donc de manière spécifique ce travail vise à :

- (i)- Superposer les différents facteurs de vulnérabilité et à élaborer des cartes de synthèse multicritères ;
- (ii)- Repérer les zones de forte vulnérabilité qui s'individualisent dans les cartes élaborées malgré l'application de différentes pondérations ;
- (iii)- Livrer plusieurs supports d'aide à la décision aux acteurs impliqués dans la gestion et la protection des ressources en eaux.

1. Elaboration des cartes de vulnérabilité globale

1.1. Méthode de la cartographie de la vulnérabilité globale « PPILK »

La méthode de cartographie de la vulnérabilité globale est mise en œuvre selon 5 étapes principales :

1. **cartographie de chaque paramètre** : chaque paramètre est évalué en indices compris entre la valeur 0 et la valeur 4. Cette étape de cartographie est réalisée à l'aide de la construction d'un SIG à partir de données disponibles sous forme de cartes, d'observations et d'acquisition de données sur le terrain ;
2. **discrétisation des cartes** : la taille du pixel des différentes couches d'information (PPILK), a été définie en fonction de la résolution du modèle numérique de terrain disponible (90mx90m¹). Cette démarche est indispensable dans le croisement des cartes ;
3. **calcul de l'indice de la vulnérabilité globale** : pour chaque maille, l'indice de classe de chaque paramètre est multiplié par le facteur de pondération déterminé au préalable. Les valeurs obtenues pour les 5 paramètres sont additionnées en chaque pixel, afin d'obtenir l'indice global de vulnérabilité. Il s'agit donc d'une superposition des 5 cartes afin d'obtenir une carte de la répartition spatiale de la vulnérabilité globale ;
4. **étape de reclassification** : La valeur des indices de la vulnérabilité globale est ensuite subdivisée en 5 classes équidistantes (selon la taille des pixels) de vulnérabilité traduisant la sensibilité relative du milieu aux influences naturelles et anthropiques (cf. tableau 4.1) ;
5. **étape de vérification et de discussions** : la confrontation de différentes cartes de vulnérabilité obtenues avec les données de terrain (données ponctuelles brutes avant interpolation) et les cartes de chaque paramètre indexé. Dans cette étape, les conditions qui permettent de qualifier les résultats comme convenables sont : (i) les zones correspondant aux terrains non karstiques, crêtes, zones sans sol doivent généralement apparaître comme étant très fortement vulnérable ; (ii) la carte finale ne doit pas comporter d'incohérences avec les cartes de chacun des paramètres ; et (iii) vérifier qu'il n'y ait pas d'incohérence entre la carte finale et la réalité du terrain.

Les deux premières étapes de la cartographie de la carte globale de la vulnérabilité ont été réalisées dans le troisième chapitre.

1.2. Calcul du facteur de pondération

L'ensemble des paramètres de vulnérabilité a été présenté dans le chapitre 3, pour l'obtention de la carte globale de vulnérabilité, il faut appliquer un « *système de pondération* » des paramètres. Les valeurs de pondération ne sont pas uniques, mais des intervalles de valeurs sont proposés, permettant à l'utilisateur de faire des tests, afin de comparer les résultats. D'autres pondérations sont possibles, basées sur des multiplications mais non adaptées ici. Le choix de l'importance du facteur de pondération doit être en adéquation avec la spécificité en termes de l'infiltration et de la recharge karstique. Le calcul utilisé qui est une combinaison linéaire des pondérations affectées à chaque paramètre est présenté de la manière suivante (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000) :

1. <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

$$\text{Facteur global de vulnérabilité} = \alpha P_{(i)} + \beta P_{(j)} + \delta I_{(k)} + x L_{(l)} + \gamma K_{(m)}$$

Avec :

$\alpha, \beta, \delta, x, \gamma$: poids de chacun des paramètres ;

i, j, k, l, m : valeur des paramètres indexés.

Le calcul du facteur de pondération est soumis à deux conditions (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000 modifié) :

- (i)- Infiltration \geq Précipitation \geq Lithologie \geq couverture Protectrice \geq Karstification souterraine $\geq 0,1$;
- (ii)- \sum des indices de pondération = 1, c'est-à-dire que la combinaison de tous les indices permet d'obtenir une note globale de la vulnérabilité égale à 1.

Afin d'éviter des dérives, nous proposons différents tests de facteurs de pondération. Ces tests consistent à déterminer des codifications variables à chacun des paramètres composant du système « vulnérabilité des eaux karstiques » (figure 4.1). Une fois les indices définis, leurs combinaisons pondérées, à l'aide d'un SIG, permettent de proposer 7 cartes différentes de la vulnérabilité globale. Il est à noter que l'intérêt du *système de pondération* est de permettre de faire des tests, afin de comparer les résultats et le choix de (ou des) combinaison (s) les plus adaptées à la problématique posée.

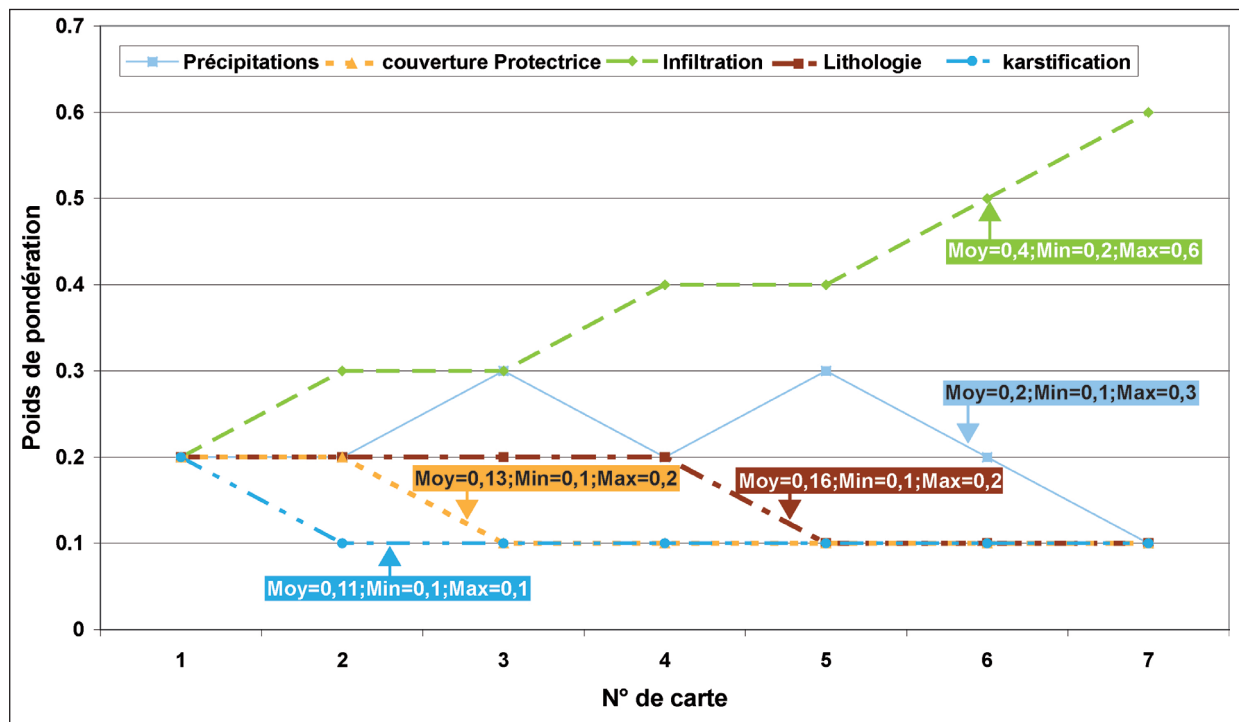


Figure 4.1 : Sept exemples de tests de facteurs de pondération attribués à chaque paramètre intervenant dans la vulnérabilité en fonction de la recharge des aquifères karstiques.

1.3. Tests des facteurs de pondération

La dissimilitude de la répartition spatiale de la vulnérabilité globale de différentes cartes est due à l'importance du poids attribué à chaque paramètre. L'attribution du poids aux couches contrôlant l'infiltration a pris en compte le respect de certaines conditions imposées aux facteurs de pondérations :

1. **le paramètre « Infiltration »** correspond à des facteurs de pondération élevés, dans la mesure où le critère « géomorphologie karstique », un des composants du paramètre « Infiltration », correspond aux points les plus favorables à l'infiltration et par conséquent à la recharge des aquifères karstiques. la moyenne des poids des facteurs de pondération attribuée à ce paramètre est de 0,4, la valeur la plus faible est de 0,2 (cartes n°1 [annexe 15a et 15f]), la valeur maximale est de 0,6 (cartes n°7 [figure 4.5 et annexe 15j]) ;
2. **le paramètre « Précipitation »** correspond à des poids de pondération assez élevés, avec une moyenne de 0,2 pour les sept cartes proposées. La valeur minimale attribuée est de 0,1 (carte n° 7), le poids le plus important est de 0,3 (cartes n°3 et 5). Le choix de cette codification est lié au rôle joué par les précipitations : ce paramètre constitue le facteur principal dans l'alimentation des aquifères karstiques dans un milieu semi-aride. Dans ce milieu, par définition, les oueds sont quasiment à sec en dehors des périodes pluviales. Il est important de noter que les pluies sont considérées comme uniformes sur des grandes surfaces de la zone d'étude, ce qui est une simplification de la réalité, surtout en milieu de relief où les pluies varient généralement en altitude, ce choix à une grande influence sur la répartition spatiale de la vulnérabilité ;
3. **le paramètre « Lithologie »** présente une moyenne des facteurs de pondération de 0,16 avec un minimum de 0,1 (carte n°5, 6 et 7) et un maximum de 0,2 affecté aux cartes suivantes : 1, 2, 3 et 4. L'importance du poids des facteurs accordé à ce paramètre est assez important. Ceci est dû au rôle de la nature lithologique et à la fracturation dans la karstification des roches en place, ainsi que la typologie et l'importance des formes développées ;
4. **le paramètre « couverture Protectrice »** a une moyenne de poids de facteurs de pondération de 0,13. Le facteur de pondération faible (0,1) a été attribué aux cartes n° 3, 4, 5, 6 et 7 et le facteur de pondération élevé (0,2) aux cartes n° 1 et 2. Cette distribution prend en compte le rôle d'atténuation de la vulnérabilité par rapport à l'infiltration, où au contraire son amplification, selon le coefficient de perméabilité et l'épaisseur des couches pédologiques et des formations superficielles. La couverture protectrice contrôle le mode, la vitesse et la durée de l'infiltration des eaux avant de drainer les roches karstifiées ;
5. **le paramètre « Karstification »** correspond à des poids de pondération plus faibles avec une moyenne de 0,11, deux valeurs de poids ont été attribuées : 0,2 (carte n°1) et 0,1 pour les cartes restantes. La faible importance de codification de ce paramètre est due au manque de données, aux connaissances lacunaires sur le réseau souterrain et à la volonté de ne pas amplifier le rôle des gouffres, critère déjà évalué dans le paramètre « Infiltration ».

1.4 Reclassification des indices de vulnérabilité globale

Toutes les cartes de vulnérabilité globale sont ordonnées en cinq classes. La valeur finale de vulnérabilité varie entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale). Le classement de ces cinq catégories a été réalisé en appliquant une division équidistante des pixels obtenus. Les classes ne seront pas générées automatiquement avec les options proposées dans les logiciels de SIG.

Classes des indices de vulnérabilité globale (pixel)	Reclassification de la vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
0-50	0	Vulnérabilité très faible
51-101	1	Vulnérabilité faible
102-152	2	Vulnérabilité moyenne
153-203	3	Vulnérabilité forte
204-255	4	Vulnérabilité très forte

Tableau 4.1 : Reclassification des catégories de vulnérabilité globale à l'aide d'un SIG d'après (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000).

Les classes de vulnérabilité obtenues traduisent le degré de vulnérabilité en chaque point de la zone d'étude.

2. Analyse spatiale de la vulnérabilité globale : interprétations et discussions des implications cartographiques

Pour mieux appréhender le rôle des facteurs de pondération sur la répartition spatiale des aires correspondantes aux indices de vulnérabilité (allant de très forte à très faible), nous avons créé un « système de pondération ». Cette approche se base sur un jeu de cartes et propose des résultats de combinaisons possibles en effectuant différents tests de poids d'importance de chaque couche d'information. Cette démarche est basée sur les couches d'informations obtenues à partir de l'application de la méthode « PPILK ».

Dans le chapitre trois, pour les paramètres « couverture Protectrice » et « Infiltration », nous avons proposé deux tests de croisement de sous critères composants de ces deux sous-systèmes : perméabilité et épaisseur pour le premier paramètre et formes géomorphologiques, pente, occupation du sol pour le deuxième.

Dans un premier temps, nous proposons les tests de répartition spatiale obtenus en se basant sur les cartes « A » (cf. figures 3.10.A et 3.19.A), dans un deuxième temps ce sont les carte « B » qui sont prises en compte (cf. figures 3.10.B et 3.19.B). Avant d'évoquer les résultats, un petit rappel de la différence entre ces deux combinaisons s'avère nécessaire :

Pour le paramètre « couverture Protectrice », la combinaison A considère que les deux critères « Perméabilité » et « Epaisseur » ont le même poids d'importance (50 %) dans le contrôle de l'infiltration et la recharge des aquifères karstiques. Par contre dans la combinaison B, nous avons accordé un poids deux fois plus important pour la couche « Perméabilité » (66 %) par rapport au critère « Epaisseur » (33 %).

En ce qui concerne le paramètre « Infiltration », la combinaison A estime que les trois critères composants du paramètres « I » : formes géomorphologiques, pente et occupation du sol présentent le même poids de facteur de pondération soit 33 %. Tandis que la combinaison B, considère que les formes karstiques, constituant les points privilégiés d'infiltration, reçoivent une note deux fois plus importante (50 %) par rapport aux autres sous critères (25 % chacun).

2.1. Combinaisons A

La combinaison des paramètres contrôlant la vulnérabilité en fonction de la recharge en appliquant les facteurs de pondération précédemment décrits (cf. figure 4.1), a permis de produire différentes cartes tests. Les sept cartes de vulnérabilité proposées comportent cinq classes de degré de vulnérabilité qui varient de très faible à très forte. La répartition spatiale du degré de la vulnérabilité est différente d'une carte à une autre selon le facteur de pondération accordé à chaque

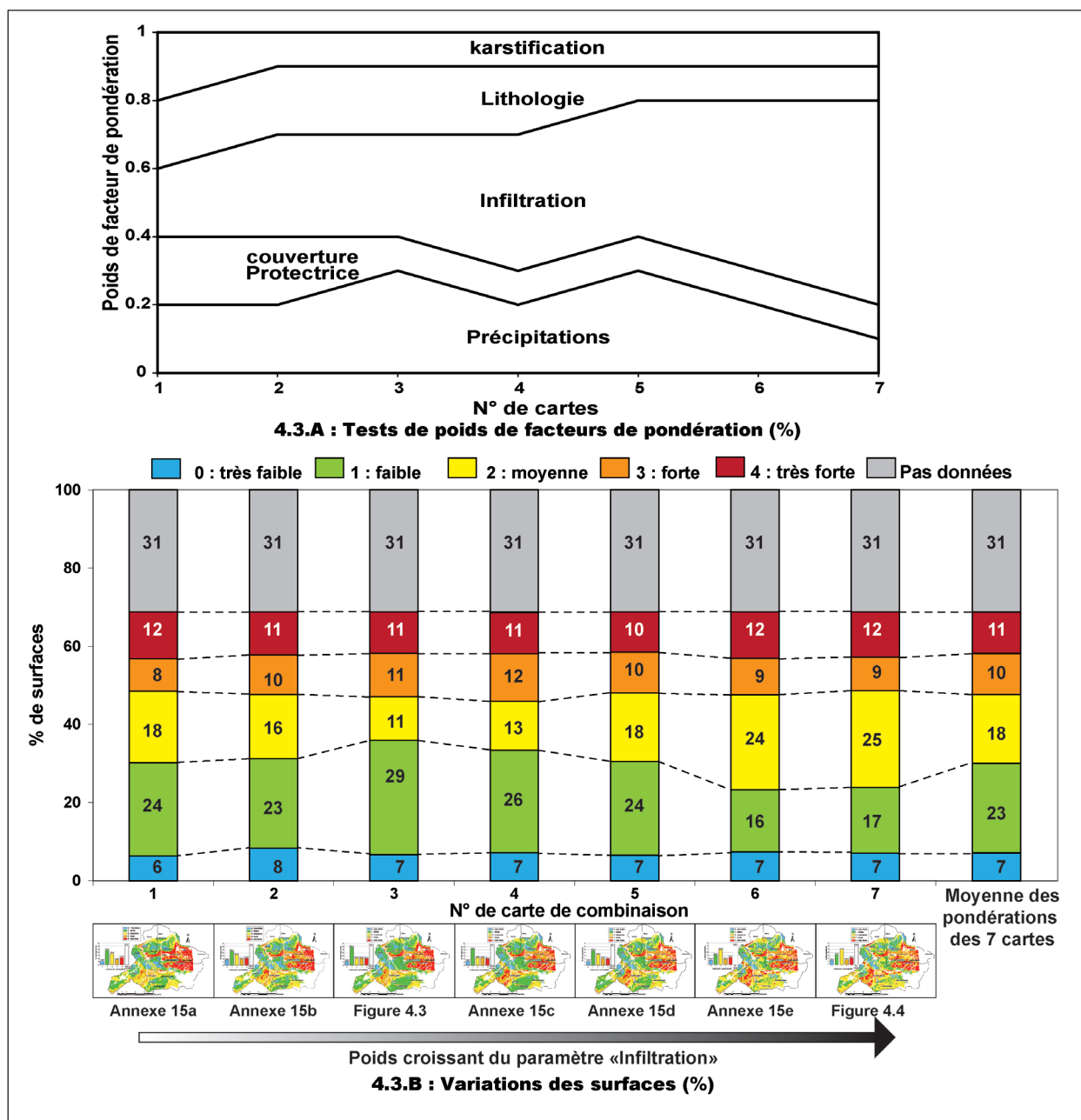


Figure 4.2 : Poids de facteurs de pondération et variation des surfaces de vulnérabilité selon les combinaisons tests proposées.

couche d'information. L'observation de la figure 4.2 montre que les classes de très faible et très forte vulnérabilité (classes extrême de la vulnérabilité) sont généralement peu variables d'une carte à une autre :

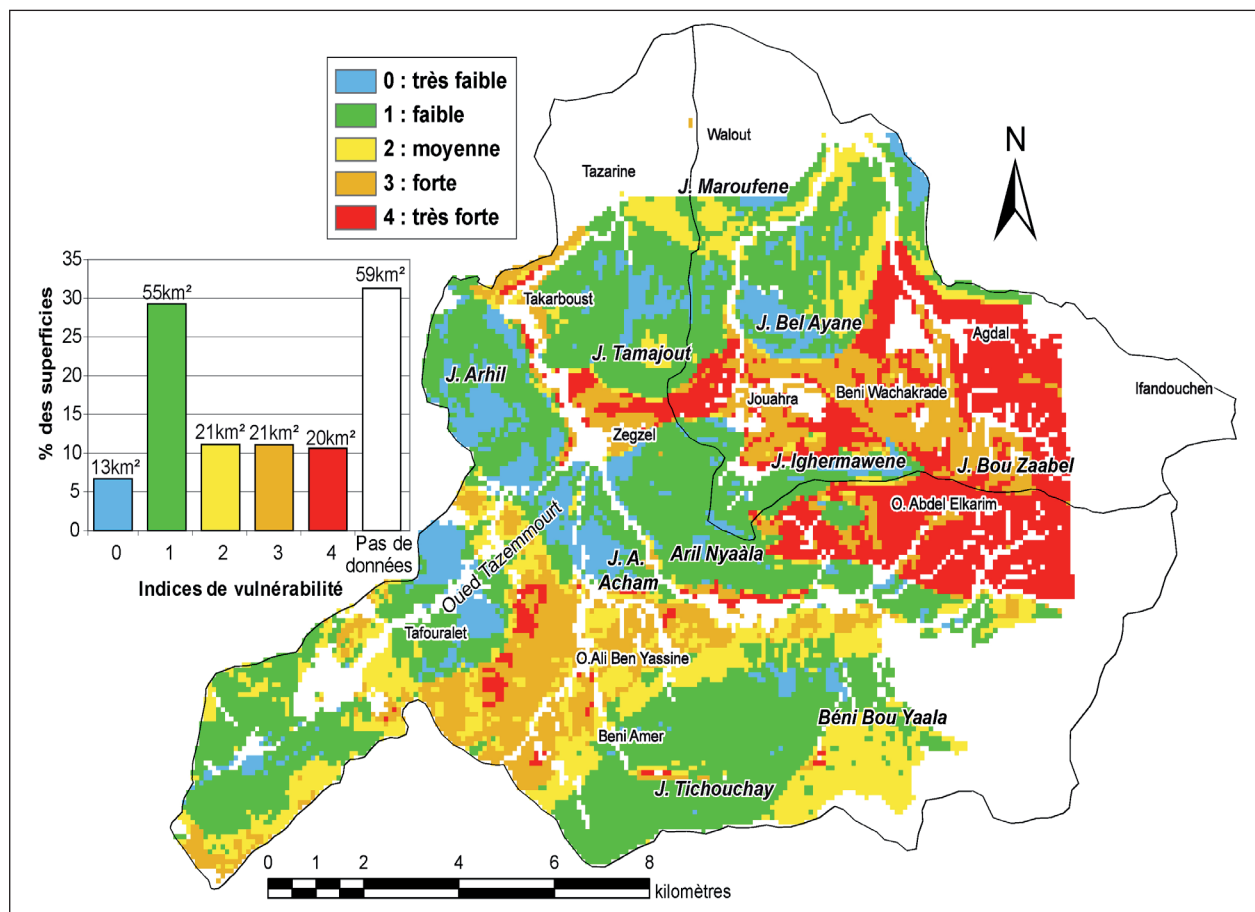
- (i)- **l'indice de très faible vulnérabilité** varie de 6 à 8 % pour les sept cartes, avec une moyenne de 7 %. Les zones de cet indice correspondent aux terrains calcaires et calcaires dolomitiques karstifiés favorables à l'infiltration et donc à la recharge des aquifères karstiques. L'accroissement progressif de l'importance du poids du paramètre « Infiltration » ne participe pas à l'élargissement de la superficie de cet indice (le pourcentage surfacique reste stable [7 %] pour les cartes n°3, 4, 5, 6 et 7 bien que le poids de facteur de pondération ait doublé entre les carte n°3 et 7). La carte n°2 présente la superficie la plus élevée de cette classe (8 %). Ceci est dû aux poids accordés aux facteurs intervenants dans la vulnérabilité : 30 % pour le paramètre « Infiltration », 20 % pour les paramètres « précipitations », « couverture

Protectrice » et « Lithologie » ;

- (ii)- l'indice de **très forte vulnérabilité** représente les terrains non carbonatés (schisteux, basaltiques et argileux), ainsi que les crêtes et les zones sans sol. Il est peu variable, la valeur la plus faible correspond à la carte n°5 avec 10 % de la surface totale de la zone d'étude, la valeur la plus élevée est équivalente à un pourcentage surfacique de 12 % de la zone d'étude ; cette valeur correspond aux cartes n° 1, 6 et 7. L'indice de très forte vulnérabilité présente une valeur moyenne de 11 % (cartes n°2, 3, et 4). La variation spatiale de cette classe est influencée par le rôle joué par le couvert végétal qui participe à l'amplification de la vulnérabilité (exemple : zones de pâturages un des sous critères d'occupation du sol, composant du paramètre « Infiltration »).

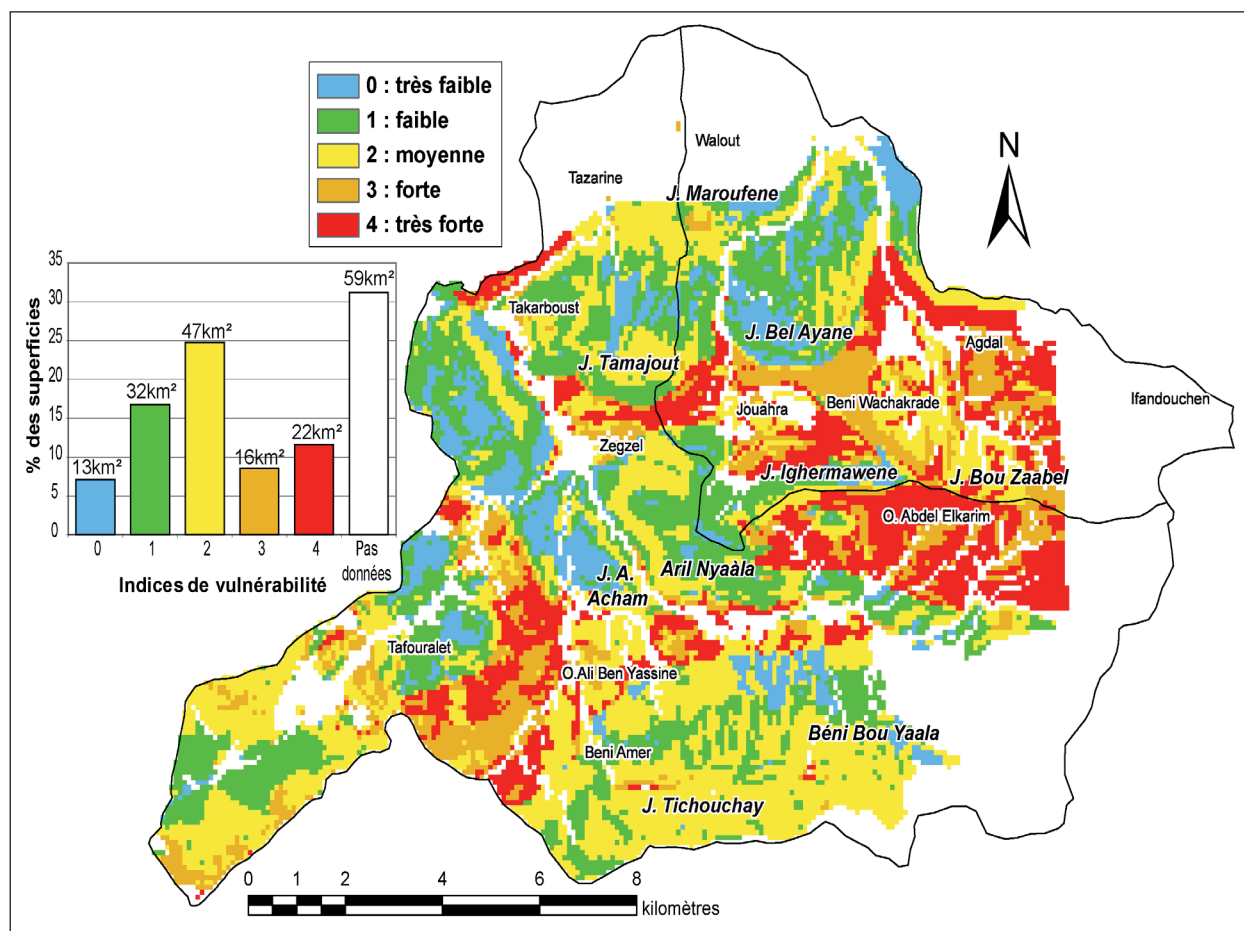
La répartition spatiale de trois indices faibles, moyens et forts est variable d'une carte à une autre :

- (i)- l'indice de **faible vulnérabilité** couvre la plus grande superficie de la région étudiée avec une moyenne de 23%. Les cartes n°3 et 4 présentent un pourcentage surfacique supérieur à la moyenne (29 % pour la carte n°3 et 26 % pour la carte n°4). Les cartes n°6 et 7 présentent des valeurs inférieures à la moyenne, avec 16 et 17 % respectivement. A partir de la carte n°3 nous constatons l'existence d'un gradient décroissant de l'importance



Dans la combinaison A le paramètre « I » : 33 % formes géomorphologiques, 33 % pente et 33 % ccupation du sol.

Figure 4.3 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 30%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 30%, Lithologie 20% et karstification 10% (carte n° 3).



Dans la combinaison A le paramètre « I » : 33 % formes géomorphologiques, 33 % pente et 33 % occupation du sol

Figure 4.4 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 10%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 60%, Lithologie 10% et karstification 10% (carte n° 7).

de cette zone ; la baisse de surface présentant cet indice est liée à l'accroissement du paramètre « Infiltration » ;

- (ii)- l'indice de **moyenne vulnérabilité** varie de 25 à 11 %, il présente une moyenne de 18 % pour les 7 cartes proposées. Contrairement à l'indice « faible vulnérabilité », nous constatons l'existence d'un gradient croissant de la surface présentant cet indice à partir de la carte n°3 ;
- (iii)- l'indice de **forte vulnérabilité** comprend des valeurs qui varient de 8 à 12 %, avec une moyenne de 11 %. L'observation de la figure 4.3 illustre la présence d'un gradient croissant. A partir de la carte n° 4, le pourcentage surfacique enregistre une baisse. L'importance du poids de paramètre « Infiltration » (supérieure à 40%) favorise l'atténuation de la vulnérabilité.

Les tests proposés donnent donc des résultats différents. Afin d'appréhender la variation spatiale des aires des classes de vulnérabilité, une étude comparative a été menée. A travers cette étude, nous nous focalisons sur les deux combinaisons les plus extrêmes : cartes n°3 (figure n° 4.3) et carte n°7 (figure n°4.4). L'étude est faite en comparative de deux phases :

- (i)- la première phase consiste à comparer les superficies de degrés de vulnérabilité obtenus (très faible, faible, moyenne, forte, et très forte) ;

- (ii)- la deuxième phase a pour but de comparer les conditions de la localisation et de la répartition des aires du même degré de vulnérabilité.

La **comparaison des superficies de degré de vulnérabilité**, nous constatons que les classes de *très faible vulnérabilité* présentent la même superficie pour les deux cartes obtenues (7 % de la superficie totale de la zone d'étude, soit 13 km²) ; les classes de *très fortes vulnérabilité* assez proches pour les deux modèles proposés avec 11 % pour la carte n°3 soit 20 km² et 12 % pour la carte n°7 soit 22 km² ; les classes de *forte vulnérabilité* présentent une superficie plus importante dans la carte n° 3 avec 11 % soit 21 km² de la superficie globale, par rapport 9 % soit 16 km² pour la carte n°7 ; la répartition spatiale des autres classes (*moyenne et faible vulnérabilité*) est très différente entre les deux cartes. L'indice de faible vulnérabilité présente 55 km² (soit 29 % de la superficie totale de la zone d'évaluation) pour la carte n°3 par rapport à 32 km² (soit 17 %) pour la carte 7. Quant aux indices de moyenne vulnérabilité, ils occupent une surface plus importante dans la carte n° 7 (47 km², soit 25 %) par rapport à 21 km² soit 11 % pour la carte n°3. La répartition spatiale des deux indices *faible et moyenne vulnérabilité* influence la disparité spatiale de la vulnérabilité entre les deux combinaisons.

En terme de **comparaison des conditions de la localisation et de la répartition spatiale des aires du même degré de vulnérabilité**, les deux modèles spatiaux présentent des résultats différents d'une classe à une autre : les modèles apparaissent performants pour l'identification des zones de :

- (i)- *très fortes vulnérabilité* dans lesquelles la combinaison des couches d'information donne des conditions favorables au ruissellement des eaux de pluies et donc empêche l'infiltration et l'alimentation des aquifères karstiques. Ces zones sont : les formations lithologiques imperméables (schistes, basaltes, argiles, etc.) rencontrées dans le secteur d'Ouled Abdel Karim, Agdal, jbel Bou Zaabel, etc. ; les crêtes caractérisées par une pente supérieure à 50 % (jbel Tamajout, jbel Bel Ayane) ; des terrains sans sol (exemple : zones présentées en rouge entre Tafouralet et O. Ali Ben Yassine) et enfin les zones de pâturage dans lesquelles un couvert végétal permanent est absent. Ce dernier sous critère est amplifié dans la carte n° 7 qui attribue un facteur de pondération de 60 % pour le paramètre « Infiltration » dont le critère occupation du sol est un des composant. L'importance du poids accordé au paramètre « I » justifie le passage d'une surface de 20 km² des zones correspondantes aux indices de très forte vulnérabilité dans la carte n° 3 (qui attribue seulement 30 % au paramètre « infiltration ») par rapport à la carte n° 7 qui présente 22 km². Cette analyse permet de mettre l'accent sur l'importance de l'intégration des autres paramètres contrôlant l'infiltration et la recharge karstique dans l'évaluation de la vulnérabilité. L'amplification du paramètre « Infiltration » néglige le rôle joué par la couverture protectrice, les précipitations, et la lithologie ;
- (ii)- *très faible vulnérabilité* correspond aux zones de plateaux calcaires et calcaires dolomitiques karstifiés (exemple : jbel Bel Ayane, jbel Arhil, jbel Aril Acham, etc.), cet indice englobe également les bassins d'alimentation des formes karstiques qui se situent sur des terrains à faible pente (entre 5 et 15%). Les formations karstique d'Aril Nyaala en sont un exemple. La disparité de la variation spatiale à l'intérieur de cet indice est lisible sur deux zones : (a) au nord de Tafouralet, l'aire bleue correspondant à la vulnérabilité très faible est plus importante dans la carte n° 3, ceci est lié aux poids attribué au paramètre « précipitations » (30 %), cette zone est correspond à une faible vulnérabilité dans la carte présentant l'indice de vulnérabilité en fonction des conditions pluviométriques (cf. figure 3.5). Le croisement de cette carte avec les autres couches d'informations (infiltration, lithologie, et couverture protectrice) a participé à l'atténuation de la vulnérabilité ; (b) la zone de Béni Bou Yaala

présente une vulnérabilité très faible dans la carte n° 7 par rapport à la carte n° 3, c'est l'importance du poids de pondération de la couche « Infiltration » (60%) et le poids accordé à la lithologie (10%, les même que les paramètres « précipitations », « couverture Protectrice » et « Karstification ») qui justifie l'extension des aires à très forte vulnérabilité dans ces zones.

Pour les classes de vulnérabilité moyenne et faible, des variations entre les modèles sont observées. Ces variations sont liées au poids du facteur de pondération accordé à chaque couche d'information. En comparant la localisation et la répartition spatiale des aires selon le degré de vulnérabilité, deux remarques s'imposent :

- (i)- l'observation des deux modèles montre que la surface des zones de faible vulnérabilité est sur-estimée dans la carte n° 3. Ces zones correspondent aux terrains calcaires lapiazés (cf. figure 3.13 et 3.23), possédant une couverture protectrice de faible vulnérabilité (cf. figure 3.10.A). Les facteurs de pondérations attribués (30 % pour le paramètre « I », 20 % pour « L » et 10 % pour « couverture Protectrice ») sont responsables de cette distribution spatiale. Certaines de ces zones sont évaluées comme moyennement vulnérables pour la carte n°7 ;
- (ii)- la carte n° 7 produite avec un facteur de pondération élevé attribué au paramètre « Infiltration » (60 %), indique que 47 % de la zone d'étude est caractérisée par une moyenne vulnérabilité, par rapport à 21 km² pour la carte n° 3. L'amplification de la superficie de la classe moyenne vulnérabilité dans la carte n°7 est due à l'influence favorable du paramètre « I » face aux autres paramètres de surface qui peuvent atténuer ou au contraire augmenter la vulnérabilité (exemple : quantité et nature des précipitations [zone humide/zone aride, intensité pluviométrique faible/intensité pluviométrique forte], propriétés physiques de la couverture pédologique [perméable/imperméable, épaisse/peu développée], etc.).

L'addition des deux classes de vulnérabilité (faible et moyenne) donne un total de 76 km² pour la carte n°3 et 79 km² pour la carte n°7, la différence entre les deux classes dans les deux cartes est de seulement 3 km², ceci met en avant que malgré le poids de pondération accordé à chaque élément contrôlant la vulnérabilité de l'infiltration et la recharge karstique, les combinaisons conduisent à l'obtention de résultats relativement adéquats avec la réalité de terrain mais avec des échelles de résolution spatiales différentes du degré de la vulnérabilité.

Dans notre cas d'étude, à première vue la carte n° 7 offre une échelle plus fine par rapport à la carte n°3, l'analyse des résultats cartographiques et statistiques et la confrontation des cartes avec les cartes de répartition spatiale de chacun des paramètres et la réalité de terrain montrent que la carte n°7 prend en considération l'influence du paramètre « Infiltration » (60%), par rapport aux autres facteurs.

2.2. Combinaison B

Les résultats cartographiques obtenus à partir de la combinaison des couches d'information PPILK, en donnant une note élevée aux critères « Perméabilité de la couverture protectrice » et « Formes karstiques », illustrent l'atténuation de la vulnérabilité avec une moyenne des deux classes très faible et faible vulnérabilité (des sept tests proposés) de 37 %. La moyenne des mêmes classes présente 30 % pour les tests proposés en se basant sur les combinaisons A (figure 4. 5).

Avec l'application de la combinaison B (figure 4.5), la zone d'étude est faiblement vulnérable avec une moyenne du pourcentage surfacique de 27 % de la classe faible vulnérabilité. La carte qui présente la superficie la plus importante de cette classe est la carte n°5 avec 68 km² de l'ensemble de la zone d'étude. Ces zones correspondent aux terrains calcaires et calcaires dolomitiques lapiazés, ce qui favorise l'infiltration lente et diffuse des eaux de pluie et participe à la recharge des aquifères

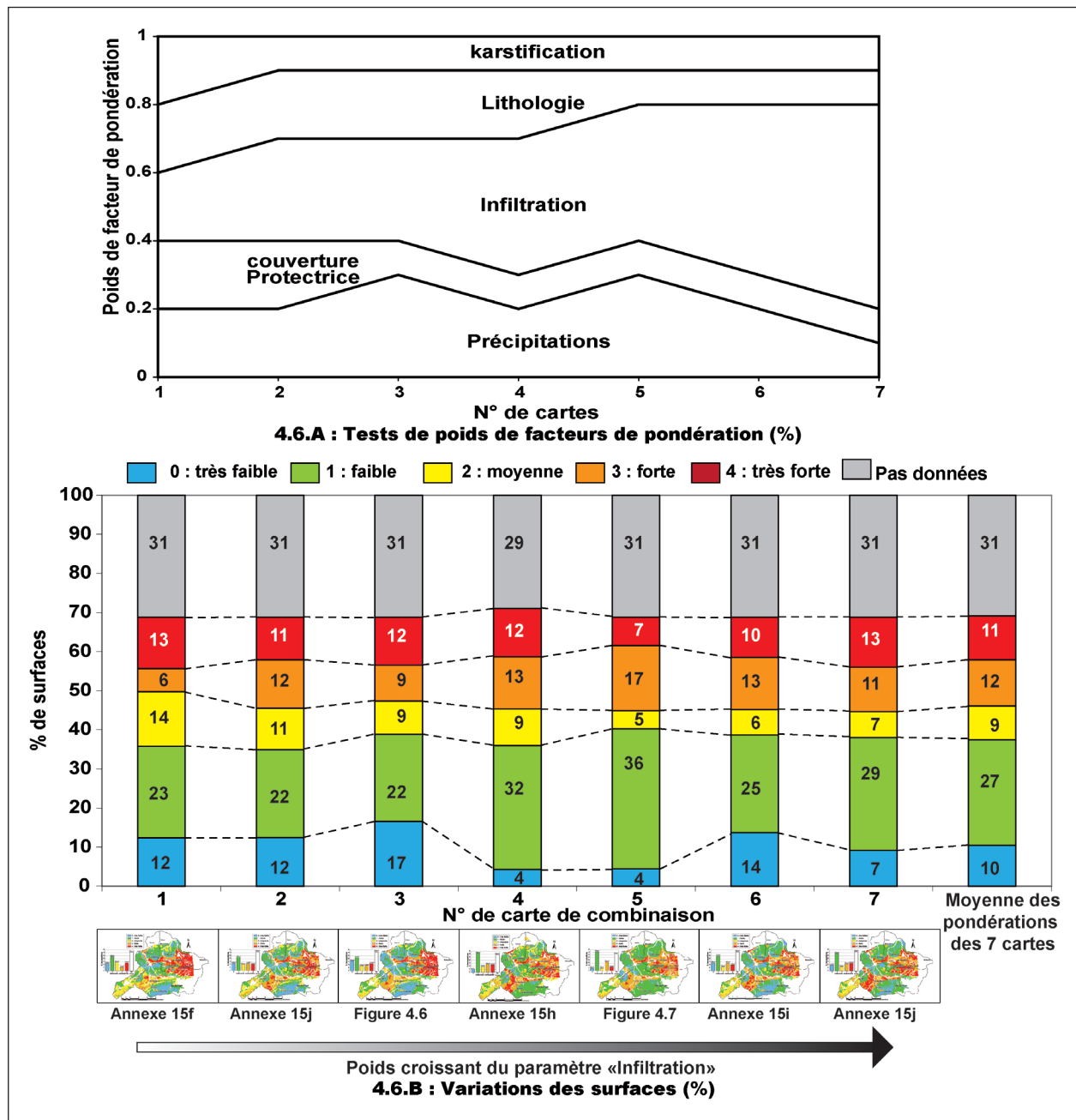
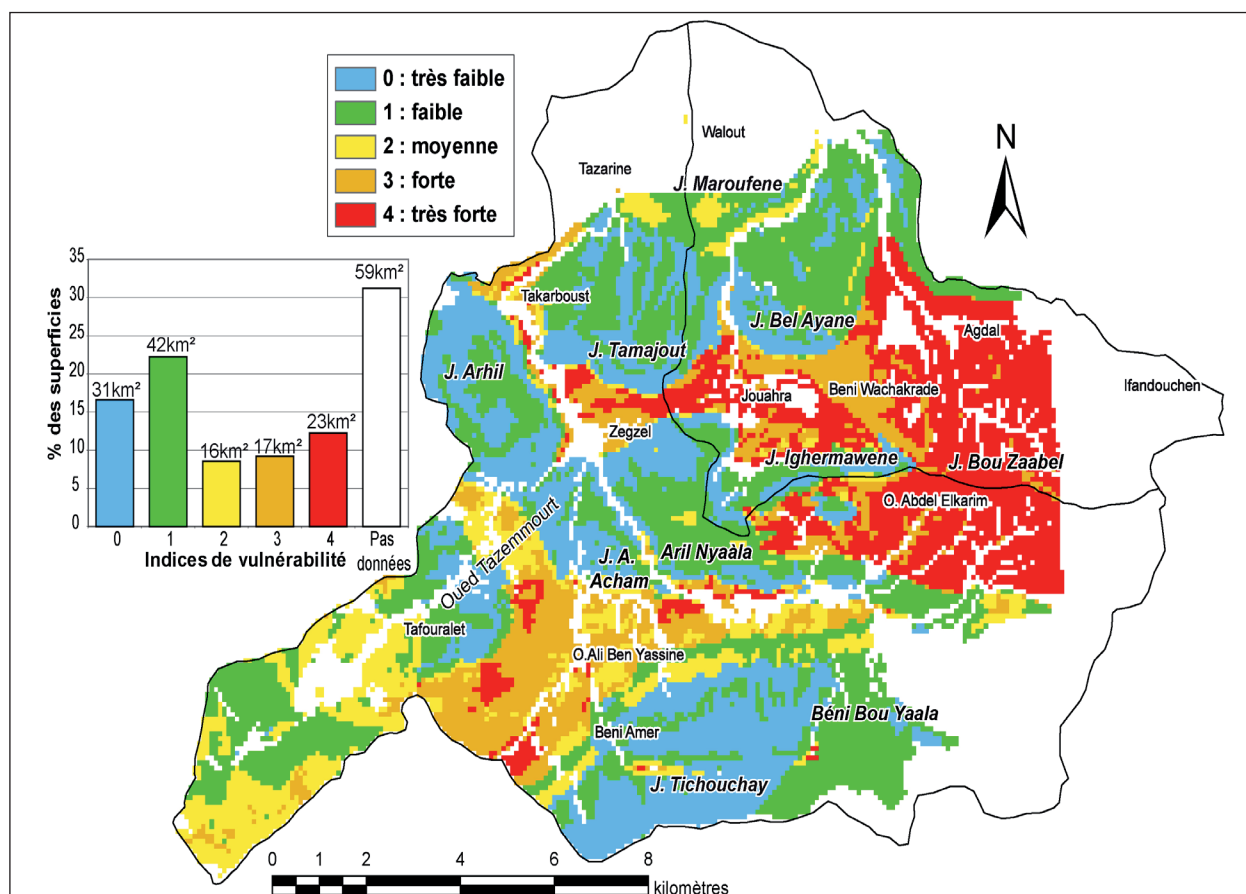


Figure 4.5 : Poids de facteurs de pondération et variation des surfaces de vulnérabilité selon les combinaisons tests proposées.

karstiques. Il est important de noter que cette combinaison a été obtenue à partir des facteurs de pondération suivant : 40 % accordés au paramètre « I », 30 % au paramètre « Précipitations », 10 % pour le reste des paramètres. La superficie la plus petite correspond aux cartes n° 2 et 3 (22 %). La localisation des aires présentant cet indice n'est pas la même pour les deux cartes. Ceci est lié aux poids de facteur de pondération. La différence de ces poids se situe dans les notes accordées aux deux paramètres « Précipitations » (20 % pour la carte n°2 et 30 % pour la carte n°3) et « couverture Protectrice » (20 % pour la carte n°2 et 10 % pour la carte n°3).

Afin de mieux apprécier la variation de la répartition spatiale, nous menons une étude comparative (comme nous l'avons fait pour les combinaisons A). Ici également nous nous basons sur les résultats les plus extrêmes : combinaison n°3 et 5 (figure 4.6 et 4.7 respectivement).

La comparaison des surfaces de degré de vulnérabilité montre que les surfaces des classes

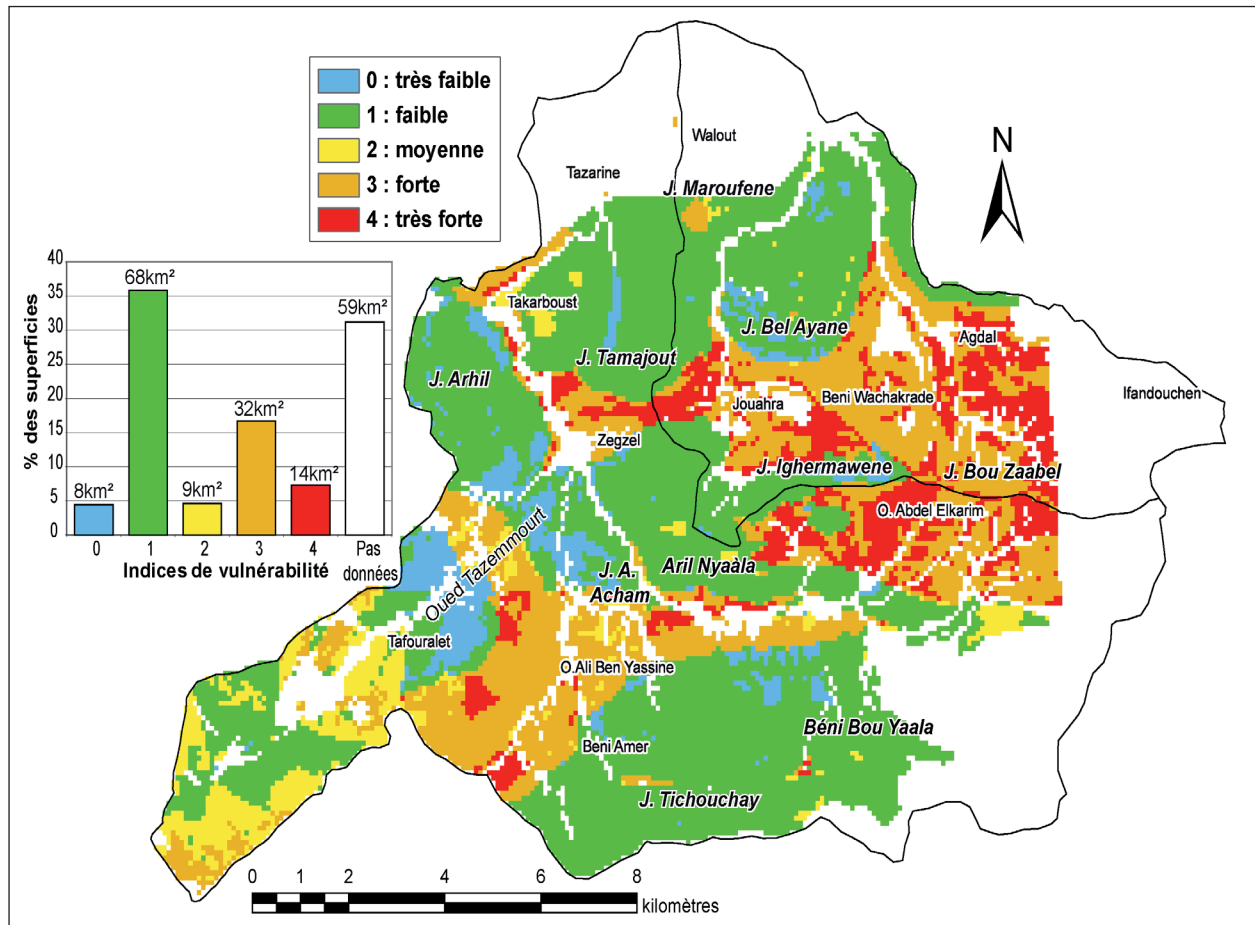


Dans la combinaison B le paramètre « I » : 50 % formes géomorphologiques, 25 % pente et 25 % occupation du sol.

Figure 4.6 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison B obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 30%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 30%, Lithologie 20% et karstification 10% (carte n° 3).

de vulnérabilité sont variables d'une carte à une autre.

- (i)- Les zones de très forte vulnérabilité présentent les zones de crêtes dans lesquelles la pente est supérieure à 50 %, les terrains sans couverture superficielle, les formations lithologiques imperméables (schistes, argiles et basaltes). L'importance des poids attribués aux critères suivants : occupations du sol (dont la densité du couvert forestier est un des sous critère), pente, couverture protectrice ont participé soit à l'élargissement des aires de cet indice (figure 4.7), soit au contraire à la réduction de ceux-ci (figure 4.7). L'attribution d'un poids de 20 % à la lithologie et de 30 % à l'infiltration pour la carte n°3 a donné un pourcentage surfacique de 12 %. En contre partie, la carte n° 5 a attribué seulement 10 % à la lithologie et la couverture protectrice, ce qui a permis l'obtention un pourcentage surfacique de 7 %. Les deux figures montrent que certaines zones s'individualisent clairement (les crêtes et les terrains sans sol) même si le poids des facteurs de pondération est différent ;
- (ii)- Les zones de très faible vulnérabilité présentent une superficie plus importante dans la carte n° 3 (17 %) par rapport à la carte n°5 (4 %). L'interaction des poids important de l'infiltration (30 %), de la lithologie (20 %), et des précipitations (30 %) pour la carte n°3 reflète une vulnérabilité très faible ;
- (iii)- Les zones de faible vulnérabilité occupent 36 % pour la carte n°5 par rapport à la carte n°3. La prise en compte de la lithologie (20 %) dans la carte n°3 a augmenté la vulnérabilité dans les zones d'alternance calcaires et marnes (exemple sud est des O. Ali Ben Yassine).



Dans la combinaison B le paramètre « I » : 50 % formes géomorphologiques, 25 % pente et 25 % occupation du sol.

Figure 4.7 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison B obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 30%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 40%, Lithologie 10% et karstification 10% (carte n° 5).

Les zones dolomitiques très karstifiées représentent des aires de très faible vulnérabilité ;
(iv) - Les surfaces des indices de moyenne et forte vulnérabilité sont variables, leurs distributions dépendent du poids des facteurs accordés à chaque critère.

La comparaison des conditions de la localisation et de la répartition spatiale des aires du même degré de vulnérabilité permet de mettre le doigt sur une certaine différence entre les deux cartes :

La localisation et la répartition spatiale des aires de très faible vulnérabilité (pour les deux cartes) est très variable. Idem pour la classe de faible vulnérabilité. En revanche, il est important de noter que la fusion de ces deux classes couvre les mêmes zones. A l'exception des formations marno-calcaires dans la zone des O. Ali Ben Yassine.

L'observation des deux modèles montre que la fusion des zones de moyenne et forte vulnérabilité couvre les mêmes zones dans les formations calcaires à l'ouest de Tafouralet, dans les plateaux calcaires des Béni Bou Yaala et aux bassins d'alimentation non boisés des dolines ce qui donne une infiltration concentrée et rapide. Cette remarque n'est pas valable dans les formations non karstiques.

En ce qui concerne les zones dans lesquelles le sol est absent et les crêtes, la vulnérabilité est

très forte pour les deux cartes. En revanche pour les formations lithologiques imperméables, la densité du couvert végétal, les caractéristiques pluviométriques, et les propriétés physiques des sols participent à l'atténuation de la vulnérabilité qui devient forte à moyenne. Les formations lithologiques imperméables ne participent pas à l'alimentation des aquifères karstiques directement. Elles sont intégrées dans l'évaluation de la vulnérabilité dans le cas de l'existence d'un système binaire.

L'étude comparative de ces deux modèles montre que deux éléments bien distincts commandent la répartition spatiale de chaque classe de vulnérabilité et la localisation et la répartition spatiale des aires du même degré :

- (i)- la réalité du terrain par rapport à chaque paramètre évalué : densité du couvert végétal, nature des formes géomorphologiques, caractéristiques topographiques, conditions pluviométriques, pratiques anthropiques, propriétés physiques et épaisseur de la couverture pédologique et enfin nature des formations lithologiques ;
- (ii)- le système de pondération appliqué à chaque combinaison.

Malgré cette variabilité, certaines zones s'individualisent, en gardant parfois le même degré de vulnérabilité. Généralement, les zones sans sol, les crêtes et les terrains schisteux, basaltiques, etc.

Les combinaisons A et B présentées précédemment proposent différentes cartes de vulnérabilité. Ces tests mettent en avant, à la fois, la variation de la répartition spatiale des aires de vulnérabilité et la variation de la localisation des aires du même degré de vulnérabilité.

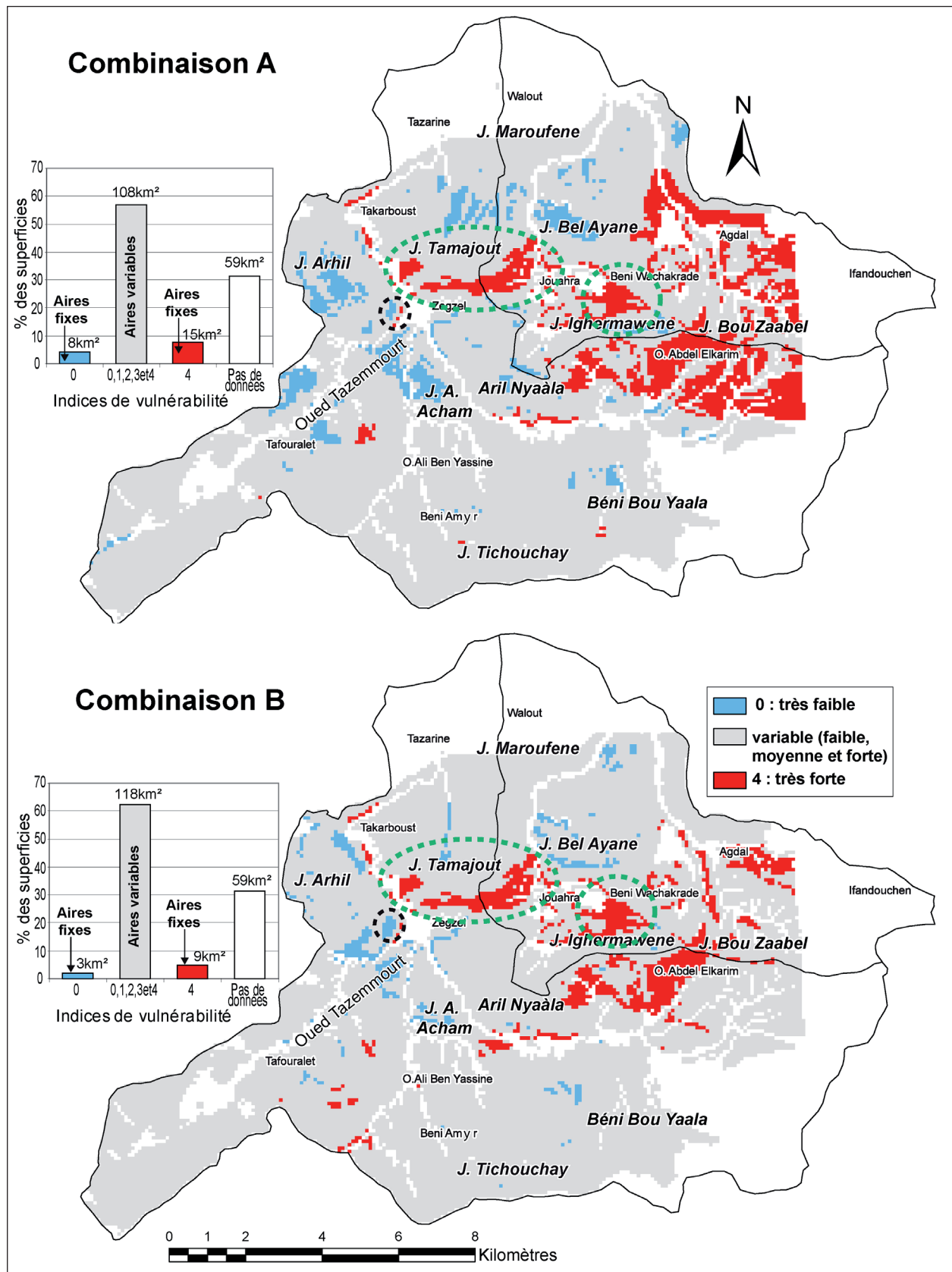
Pour mettre le point sur la localisation spatiale des aires du même degré de vulnérabilité, nous proposons des résultats cartographiques, à partir desquels nous présentons les aires fixes (aires présentant la même localisation et le même degré de vulnérabilité dans les combinaisons traitées). Cette application illustre les aires fixes des deux indices de vulnérabilité extrêmes : très faible et très forte. Le reste présente des degrés variables de la vulnérabilité.

3. Résultats synthétiques

Deux résultats synthétiques ont été obtenus, ils permettent de repérer les zones de très faible et très forte vulnérabilité en utilisant deux combinaisons A et B des paramètres « PPILK » (**la combinaison A** considère que les deux critères « perméabilité » et « épaisseur » ont le même poids d'importance. **La combinaison B** accorde un poids deux fois plus important pour la couche « perméabilité » (66 %) par rapport au critère « épaisseur » (33 %)).

La superposition des sept cartes de la combinaison A et B dans un SIG permet de mettre en avant les zones présentant la même localisation spatiale et le même degré de vulnérabilité. Cette application concerne seulement les zones de très faible et très forte vulnérabilité. Ce choix est fait afin de mettre l'accent sur les zones correspondant aux degrés de vulnérabilité les plus extrêmes (très faible et très forte vulnérabilité). Il est important de souligner que les aires de cet indice présentent généralement des pourcentages surfaciques peu variables par rapport aux autres degrés de vulnérabilité. Cette démarche permet donc d'identifier la localisation des aires de très faible et très forte vulnérabilité présentes dans la combinaison superposée.

La figure 4.8 montre que *les zones de très forte vulnérabilité (rouge)* correspondent à une superficie de 15 km² dans la combinaison A et de seulement 9 km² pour la combinaison B. Ces zones sont associées aux formations lithologiques imperméables (schistes, basaltes et argiles), aux crêtes caractérisées par une pente supérieure à 50 % et aux terrains sans sol. Les zones présentées en rouge sont les aires les plus pénalisantes à l'infiltration et donc à la recharge des aquifères karstiques.



Les zones de très faible vulnérabilité (bleu) présentent les aires les plus renforcées du système. Pour les deux combinaisons, ces zones sont les plus favorables à l'infiltration et à l'alimentation des aquifères. Ces aires correspondent aux terrains calcaires à faible pente, couvert par une végétation forestière dense et enregistrant des précipitations élevée (500 mm/an) avec une intensité pluviométrique faible (inférieure à 10). Ces zones ont une superficie de 8 km² pour la combinaison A et 3 km² pour la combinaison B.

Les zones en gris présentent les aires de degré de vulnérabilité variables d'une carte à l'autre (la vulnérabilité varie de très faible à très forte). Ces zones présentent une superficie de 108 km² pour la combinaison A et 118 km² pour la combinaison B. La variation du degré de la vulnérabilité, implique une gestion de ces zones afin d'appliquer des mesures adaptées pour réduire la fragilisation du milieu.

La variation de la localisation spatiale des aires de vulnérabilité entre les deux combinaisons A et B est liée aux « facteurs de pondération » accordées aux couches d'information. Par exemple dans la combinaison B, le critère « Perméabilité du sol » donne un poids deux fois plus important (66 %) par rapport au critère « Epaisseur du sol » (33 %). Cette attribution a permis l'atténuation du degré de vulnérabilité sur les terrains non calcaires (jbel Bou Zaabel), pour la combinaison B, et l'amplification de la vulnérabilité pour d'autres terrains calcaires, exemple aires rouges entre O. Ali Ben Yassine et Tafouralet.

La figure 4.8 montre que malgré les différents tests de facteur de pondération pour les deux combinaisons proposées, certaines zones présentent le même degré de vulnérabilité par exemple les formations lithologiques des Béni Wackrade et les crêtes de jbel Tamajout Présentent toujours le même degré de vulnérabilité (très forte) pour les deux combinaisons a et B.

Afin de mieux apprécier l'évolution temporelle de la vulnérabilité (chapitre 6), nous utiliserons les facteurs de pondération de la carte n° 2 de la combinaison B. Ce choix se justifie par la répartition des poids de facteurs de pondération sur tous facteurs intervenant sur la vulnérabilité (30 % pour le paramètre « I », 20 % pour les paramètres « précipitations », « couverture Protectrice » et lithologie et 10 % pour le paramètre « K ». Dans cette carte, le paramètre « I » présente 50 % du poids du facteur de pondération du sous critère « formes géomorphologiques », les deux autres critères « Pente » et « occupation du sol » présentent le même poids de facteur de pondération, soit 50 %.

Conclusion

L'élaboration des cartes de vulnérabilité a été effectuée en plusieurs étapes : après avoir proposé différents facteurs de pondération, la combinaison des cinq paramètres intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques (Précipitations, couverture Protectrice, Infiltration, Lithologie, Karstique) permet de proposer 14 tests de la répartition spatiale de vulnérabilité. Ceux-ci se divisent en deux grandes unités : Combinaisons A dans lesquelles le facteur de pondération des sous critères composants des paramètres « couvertures protectrice » et « infiltration » a le même poids de pondération. Les combinaisons B accordent aux sous critères « perméabilité de la couverture protectrice » et « formes karstiques » un poids plus important que les sous critères « épaisseur », « pente » et « occupation du sol ».

Les résultats obtenus permettent de définir la localisation spatiale des classes de vulnérabilité à des échelles de précision différentes. Pour l'interprétation et la discussion de la variation spatiale des résultats obtenus, une étude comparative, entre les deux cas les plus extrêmes (pour les deux combinaisons proposées) a été menée. Ces résultats confirment le rôle des deux paramètres « Lithologie » et « Infiltration » dans le contrôle de la répartition spatiale des aires de vulnérabilité malgré les différents « facteurs de pondération » appliqués. Le critère « occupation du sol » joue également un rôle important dans la détermination du degré de vulnérabilité. Cette étude révèle

donc l'importance de la prise en considération de ce critère dans l'évaluation de la vulnérabilité.

L'intérêt de cette évaluation de la vulnérabilité est de montrer la variabilité de la résolution d'échelle en fonction de l'importance du poids accordé à chaque paramètre. Nous constatons également que des zones de vulnérabilité similaire s'individualisent dans toutes les cartes malgré le système de pondération appliqué. Ces zones sont les terrains sans couvertures protectrice, les crêtes, les formations lithologiques imperméables, les formations calcaires et dolomitiques très karstifiées, les bassins d'alimentation des formes karstiques, les zones de pâturage, etc.

Ces cartes peuvent servir à l'identification du degré de vulnérabilité dès l'impluvium, comme elles peuvent être utiles pour la réduction de la vulnérabilité par des interventions adaptées à chaque aire de vulnérabilité. Il est important de souligner qu'elles peuvent être améliorées par l'intégration de données manquantes (sol) et la précision de certaines données (précipitations). En ce qui concerne la cartographie de la vulnérabilité de la couverture pédologique, la carte des sols de référence ne couvre pas la totalité du terrain évalué. 59 km² de données sont manquantes dans la carte des sols initiale. Ce manque de données influence l'obtention des cartes globales de vulnérabilité (59 km² des terrains sont dépourvus de données) malgré l'existence des informations dans les quatre autres couches. Pour pouvoir faire face à ce manque et pour définir l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle de la zone d'étude, il est possible de proposer une autre clé de lecture qui permet d'explorer les couches d'informations sans l'intégration de la couche « couverture Protectrice ». Quant au paramètre « Précipitations », son évaluation s'est basée sur des stations pluviométriques éloignées de la zone d'étude. Ce choix était imposé à cause du manque de données des stations proches de la zone d'évaluation. Dans le cas de la disponibilité de ces données, l'extrapolation des informations disponibles livre des résultats proches de la réalité.

Les cartes d'évaluation de la vulnérabilité en fonction de l'infiltration et de la recharge des aquifères karstiques, constituent un support important de la protection des ressources naturelles. Elles montrent que l'évaluation de la ressource en eau souterraine, nécessite l'évaluation de l'ensemble des sous systèmes composant de la vulnérabilité des eaux souterraines. Elles constituent également un outil de la gestion territoriale, et donc du développement durable.

CHAPITRE 5

KARST ET TEMPS LONG : UNE RECONSTITUTION PALÉO-GEOGRAPHIQUE DE LA GROTTE DU CHAMEAU

La dimension souterraine permet d'aborder les événements environnementaux qui sont difficilement perceptibles à partir des études et des données de surface. Les informations paléogéographiques et environnementales contenues dans l'endokarst se situent au niveau :

1- des conduits à partir desquels les morphologies permettent de reconstituer les conditions initiales de creusement ainsi que les différentes phases d'évolution de la cavité ;

2- des dépôts endokarstiques (détritiques et carbonatés) qui permettent d'appréhender l'environnement extérieur (climatique, bio-pédologique) et ses variations dans le temps. Ces dépôts sont relativement protégés des agents d'érosion, ce qui donne une mémoire permettant de travailler à différentes échelles de temps.

Ce chapitre a donc pour objet de présenter la morphologie souterraine en tant qu'outil permettant d'étudier la répartition spatiale des formes et des dépôts endokarstiques ainsi que leurs succession chronologiques. L'intérêt essentiel de cette approche est d'identifier les différents processus intervenant dans la genèse de la grotte et leurs relations. Il est important de souligner que cette évolution est, en grande partie, conditionnée par les événements extérieurs (tectoniques, eustatiques, climatiques, etc.).

Afin de définir l'évolution temporelle du karst de la région, et de comprendre la mise en place de certaines sources karstiques rencontrées dans la zone d'étude, l'analyse est appliquée à la grotte du Chameau. Ce choix est fait grâce à la particularité spéléologique de la grotte.

Ce chapitre s'organise en deux parties :

1- Dans la première partie, seront présentés des coupes clés présentant les processus d'évolution de la grotte. Cette démarche cartographique permet de mettre le doigt sur les éléments de la morphologie souterraine. Ces coupes permettront la reconstitution paléo-environnementale du site ;

2- Dans la seconde partie, une interprétation spéléogénique et paléo- environnementale est proposée à partir de la démarche cartographique.

1. Etude paléo-environnementale de la grotte du Chameau

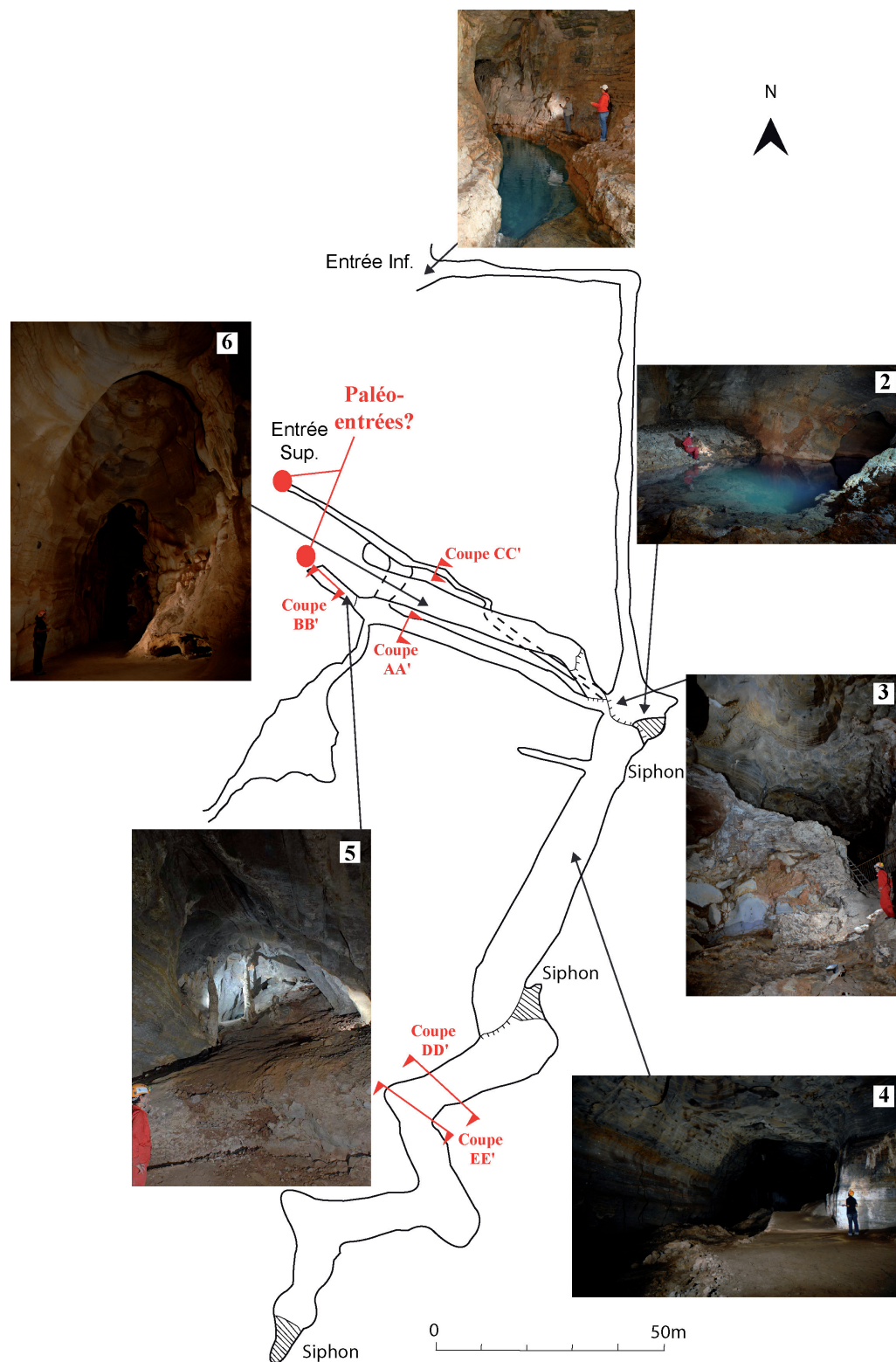
La grotte du Chameau est la plus connue dans la région orientale du Maroc. Cette grotte est creusée dans le ravin de l'oued Ferrouj à environ 1 km de Zegzel. Elle s'ouvre à la base d'un escarpement calcaire dolomitique du Lias inférieur de jbel Aril Acham. Cette grotte présente un développement de 700 m environ dans la partie explorée.

Elle possède deux entrées :

1- l'entrée inférieure est située à 5 m au dessus de l'oued, elle constitue une résurgence dont le diamètre est de 5,5 m (figure 5.2 (1)), elle prend la forme d'une voûte rectiligne qui s'abaisse pour former un passage très restreint à la grande salle ;

2- l'entrée supérieure perchée à 50 m au dessus du ravin de l'oued Ferrouj. Cette partie offre de riches concrétionnements : coulées stalagmitiques et draperies (figure 5.2 (6)).

La grotte du chameau est constituée de quatre étages (figure 5.1 et 5.2) :



Source : (CAMUS et al., 1981)

Figure 5.2 : Plan de la grotte du Chameau. Les coupes AA' à EE' sont décrites dans les figures suivantes

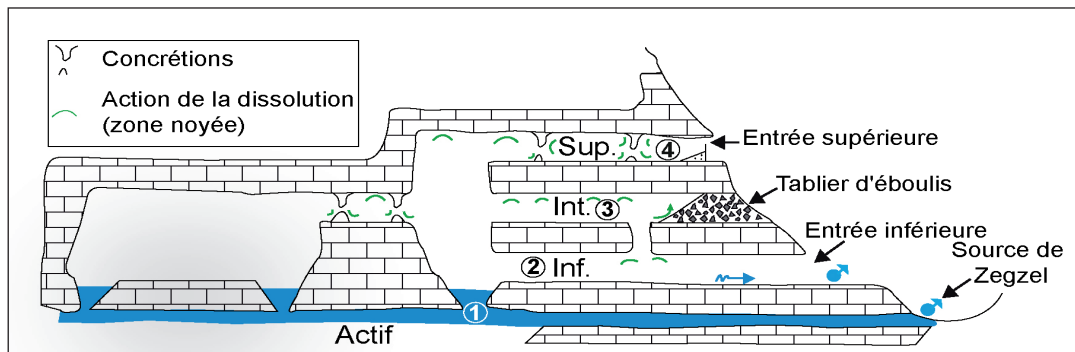
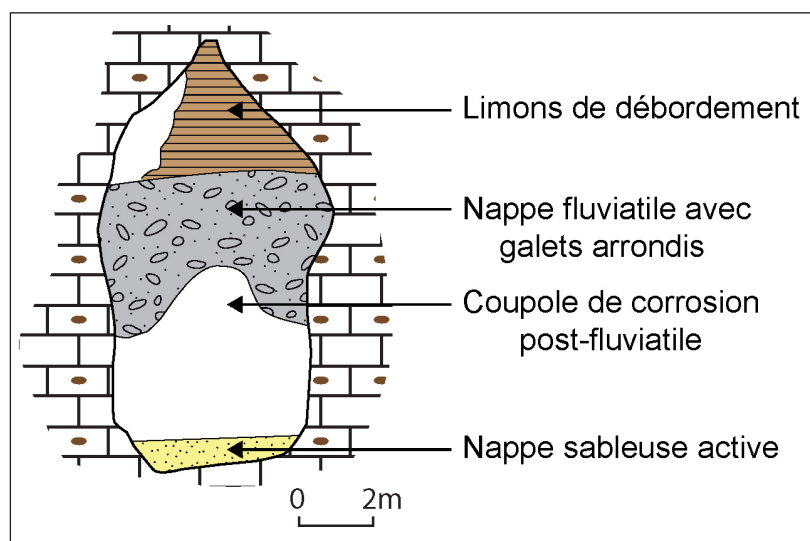


Figure 5.1 : Illustration schématique des quatre étages de la grotte du Chameau plus ou moins génétiques (étage supérieur : galerie longiforme ; étage intermédiaire : gros tube ; étage inférieur : tube diaclase ; étage noyé).

- **l'étage actif** (étage n°1) qui alimente la source pérenne de Zegzel ;
- **l'étage inférieur** (étage n°2), présente des galeries diaclases. Ces galeries aboutissent sur une grande salle qui donne sur tous les étages de la grotte (figure 5.2 (3)). Cette salle possède un lac actif (figure 5.2 (2)) dont les concrétionnements qui l'entourent sont en choux-fleurs. A l'ouest de cette salle, une galerie de direction (est/ouest) est caractérisée par des dimensions modestes. Dans cette galerie nous avons identifié un dépôt de galets arrondis d'origine fluviatile présentant des surfaces bien lisses (figure 5.3). Ce remplissage témoigne d'une ancienne circulation et donc d'une activité ancienne du réseau souterrain. Les étapes de la mise en place de cette galerie sont : (i) creusement d'un tube sur diaclase ; (ii) remplissage alluvial (galets très émoussés) ; (iii) dépôt de limons de fin de séquence ; (iv) cimentation ; (v) corrosion en régime noyé ce qui a donné des coupoles ; mise en place de sable de débordement (actif). Au sud de la salle, l'étage inférieur se prolonge présentant une rivière souterraine active pendant les hautes eaux ;

Figure 5.3 : Remplissage d'origine fluviatile de la galerie ouest de l'étage inférieur de la grotte du chameau.



- **l'étage intermédiaire** (étage n°3) est composé de galeries en forme de gros tube. La galerie parallèle à la galerie du premier étage se prolonge à 60 m environ, elle présente trois générations de concrétionnements dont la dernière est toujours active. Dans cette galerie les parois, les stalagmites et le plafond sont fortement érodés. Au fond de cette galerie nous avons constaté la mise en place du tablier d'éboulis (figure 5.2 (5)). Au sud de la salle centrale, la galerie présente une forme tubulaire sans concrétionnement et à fond plat. Cette conduite forcée communique avec l'étage inférieur par une grande salle ;
- **l'étage supérieur** (étage n°4) après l'entrée, une galerie longiforme (figure 5.2 (6)) de direction est/ouest et d'une longueur d'environ 60 m présente des concrétionnements (draperies et coulées stalagmitiques) très érodées ce qui témoigne d'une remise en charge de la grotte du Chameau à plusieurs reprises (photo 5.1).



Photo 5.1 : Les écoulements stalagmitiques, les parois de l'étage supérieur fortement érodés, témoignent de l'existence d'un régime noyé.

Il est important de noter que l'étagement des niveaux dans la grotte du Chameau se place dans un contexte de karst barré : les formations calcaires et dolomitiques très karstifiées sont en contact avec un support imperméable permo-triasique (figure 5.4). Ces conditions lithologiques permettent le développement d'un fossé tectonique dans les roches perméables et obligent une partie des eaux souterraines à émerger en donnant naissance à des sources pérennes tel que la source de Zegzel, Halouma, etc. dans ce cas de figure, la faille et l'intersection avec le réseau hydrographique qui conditionnent la position de l'exutoire.

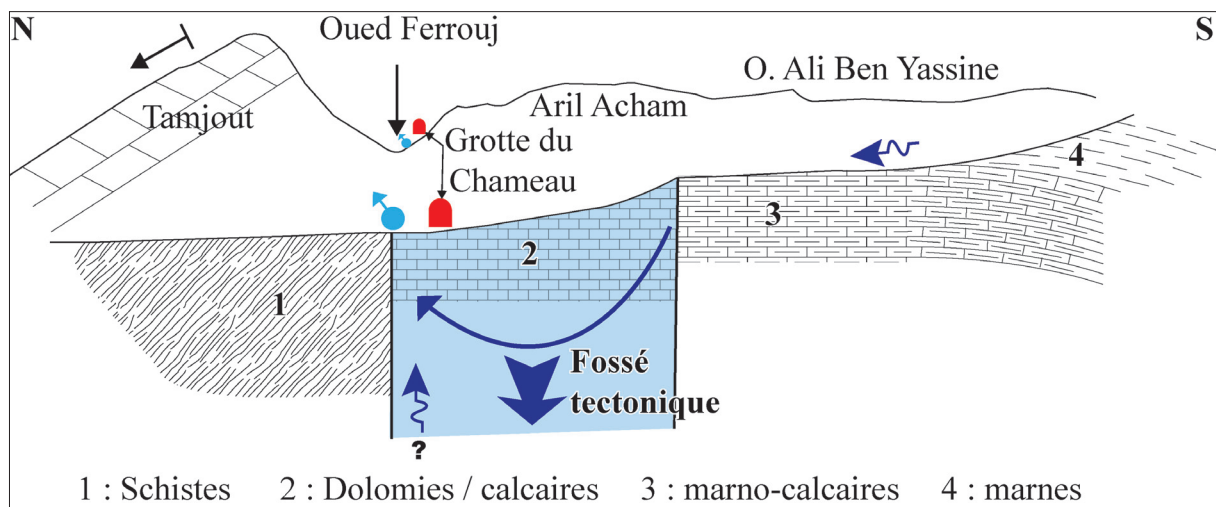


Figure 5.4 : Coupe synthétique du karst barré de la grotte du Chameau

Mais qui commande les phases d'abaissement et de remontée de niveau de base ? Plusieurs hypothèses seraient à tester (eustatisme, néo-tectonique, travertins) mais n'ont pas fait l'objet de nos recherches.

2. Cartographie morphologique souterraine : reconstitutions paléo-environnementales

L'objet de la cartographie morphogénique souterraine est d'ordre méthodologique, car la cartographie repose à la fois sur les observations et les interprétations des phénomènes visibles, ce qui permet d'apporter des éléments de réponse sur leurs présences, leurs relations et leurs emboîtements. Le support cartographique permet d'assembler sur le même document, les différents processus qui ont intervenu dans l'évolution de la grotte.

Cette partie permet donc l'identification des différents processus qui ont intervenu dans la spéléogénèse, et la chronologie des événements morphogéniques. Cette démarche repose sur la reconnaissance des formes et des formations endokarstiques et de leurs rapports dans le temps et dans l'espace. Il est important de souligner que cette démarche repose sur (DELANNOY *et al.*, 2001) :

- (i) l'analyse des vides endokarstiques (morphogénèse des conduits) ;
- (ii) l'étude de différentes formations qui s'y sont sédimentées (types et modes de dépôts) ;
- (iii) les formes inscrites dans les dépôts (incision, déformation du sédiment, etc.)

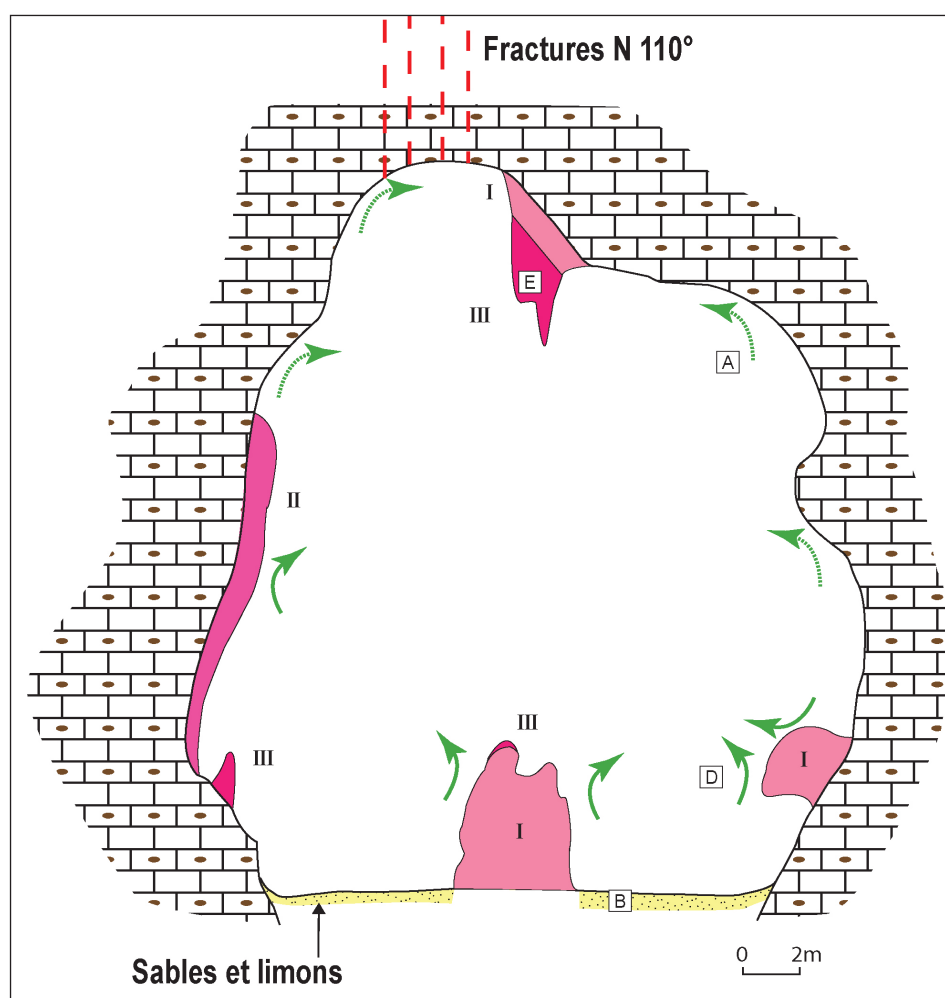
Ce triptyque « vides/formations/microformes » est à la base de notre démarche cartographique.

Pour tenter d'éclairer l'évolution de la grotte du Chameau, nous avons repéré des sites clés qui présentent des indices morphologiques (cinq coupes). Des relevés cartographiques ont été effectués sur ces zones pour proposer des étapes spéléologiques de la grotte.

2.1. Coupe AA'

Les étapes de mise en place de la galerie de type tubulaire permettent d'envisager les étapes spéléogéniques suivantes (coupe AA' ; figure 5.5) :

- A : édification de conduits creusés en zone noyée marquée par la mise en place de coupes de plafond ;
- B : passage à un régime « vadose » qui a permis la mise en place d'une formation sableuse, associé à un enfoncement du niveau de base ;
- C : mise en place de stalagmites et de planchers stalagmitiques (génération I et II) ;
- D : de profondes coupes qui affectent les concrétionnements (génération I et II) suggèrent un nouvel ennoiment prolongé des galeries ;
- E : Mise en place d'une nouvelle série de concrétions (génération III), actuellement toujours sub-active.



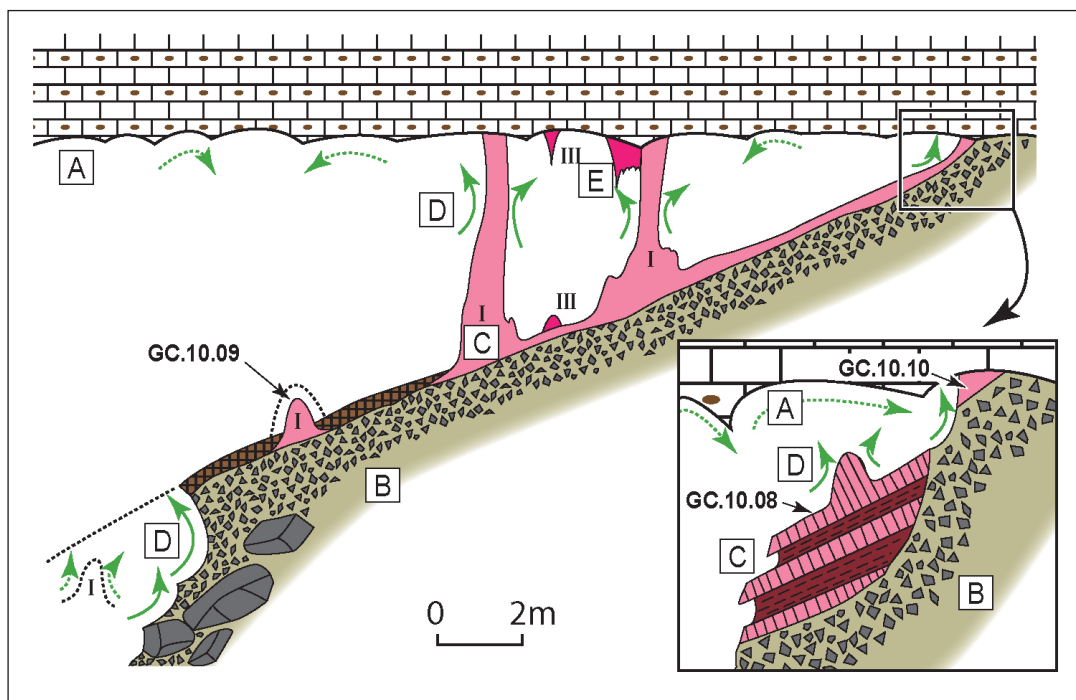
Légende : cf. figure 5.7

Figure 5.5 : Coupe de la galerie intermédiaire (coupe AA') de la grotte du Chameau.

2.2. Coupe BB'

Cinq étapes pour la mise en place de la coupe de la galerie intermédiaire (coupe BB') ont été identifiées (coupe BB' ; figure 5.6) :

- A : Erosion en régime noyé marqué par la mise en place de coupoles de plafond et affectant les calcaires gris à silex. Il semble possible de déceler un paléo-sens de circulation de l'intérieur de la grotte vers la vallée (ici de la gauche vers la droite) ;
- B : Mise en place du tablier d'éboulis (B1 – Blocs calcaires décimétriques à métriques à la base et B2 : Gélifracfs calcaires centimétriques). Dans la partie base de la coupe, la matrice est non carbonatée et offre une forte cohésion. Dans la partie supérieure, la matrice est plutôt argileuse rouge. L'ensemble traduit un environnement vadose avec pénétration de matériel provenant de l'extérieur (paléo-entrée probable actuellement comblée par cet éboulis, peut être en contexte froid) ;
- C : Mise en place de stalagmites et de planchers stalagmitiques (génération I). Dans la partie basale de la coupe, le plancher stalagmitique cède la place à une croûte noirâtre à brune marquée par une forte précipitation ferrugineuse ;
- D : Phase d'érosion en régime probablement noyé, se traduisant par une altération généralisée des parois calcaires et des stalagmites de génération I. Les traces morphologiques laissent supposer une altération en contexte noyé ;
- E : Mise en place d'une nouvelle série de concrétions (génération III), actuellement toujours sub-actives.



Légende : cf. figure 5.7

Figure 5.6 : Coupe de la galerie intermédiaire (coupe BB') de la grotte du Chameau.

2.3. Coupe CC'

Dans la galerie ouest de l'étage inférieur (galerie parallèle à l'étage supérieur) on observe plusieurs étapes de la mise en place (figure 5.7) :

- A : Creusement d'une galerie tube sur diaclase ;
- B : dépôt de conglomérat arrondi d'origine fluvatile. Ce remplissage est plurimillimétrique à pluricentimétrique hétérogénique avec un diamètre maximal de 5 cm à dominante calcaire à matrice carbonatée. L'ensemble traduit un environnement noyé avec pénétration de dépôt alluvial provenant de l'extérieur (paléo- exutoire probable actuellement fermé). Ceci implique deux hypothèses : (i) la cavité a fonctionné en perte de l'oued Ferroj ; (ii) effondrement du paléo-lit de l'oued ;
- C : mise en place d'une croûte noirâtre ce qui traduit l'existence d'un environnement vadose ;
- D : Phase d'érosion en régime probablement noyé, se traduisant par une altération généralisée des parois calcaires et de conglomérat ;
- E : dépôt de conglomérat très émoussé plurimillimétrique à pluricentimétrique à élément probablement carbonatée car dissout et à matrice siliceuse. Ceci est le témoignage d'un milieu noyé. Ce remplissage vient napper une morphologie à coupole caractéristique d'une corrosion noyée. L'ensemble a connu une érosion de régime noyé ;
- G : Mise en place d'une nouvelle série de concrétions (génération III), actuellement toujours sub-actives.

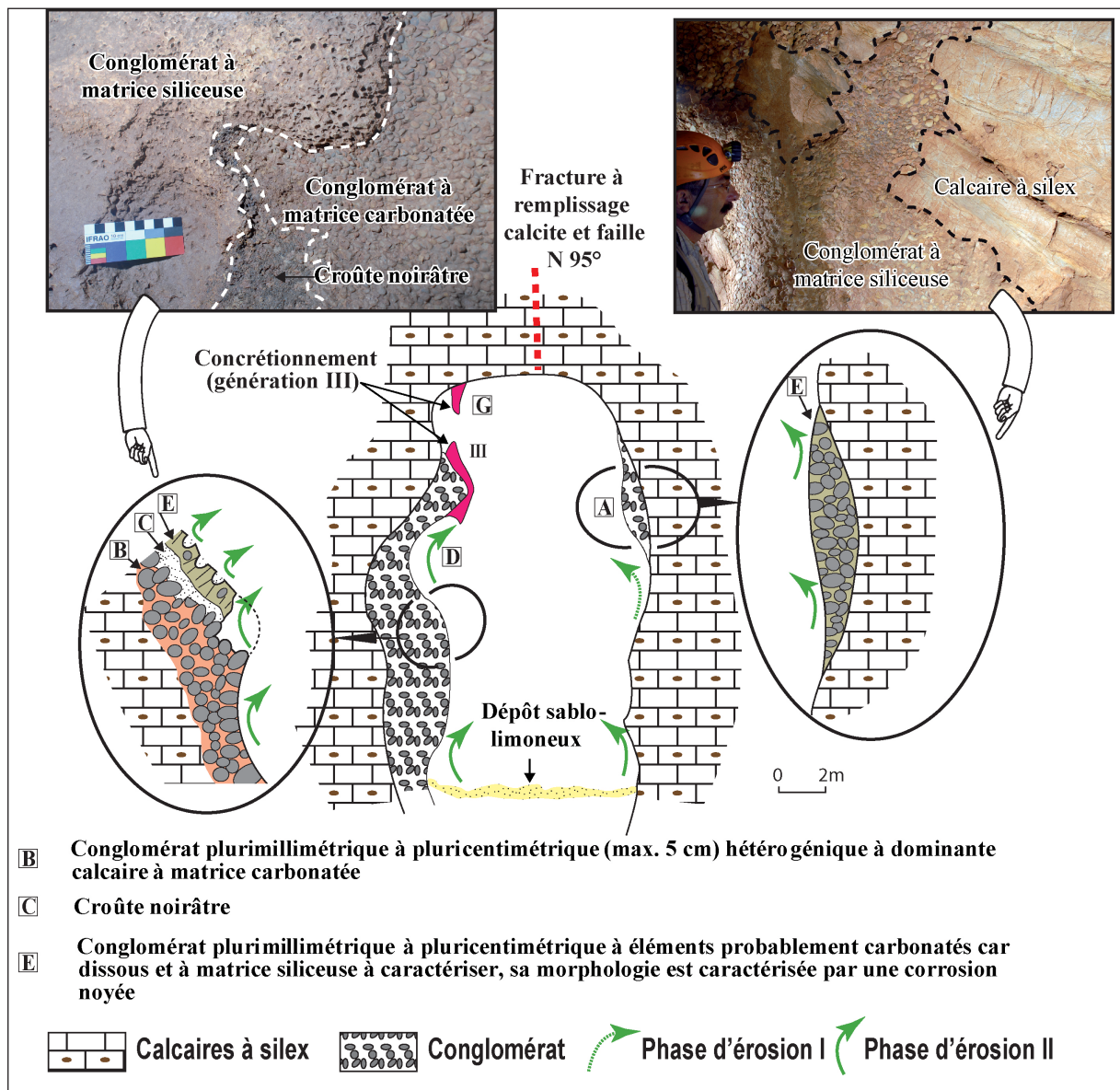
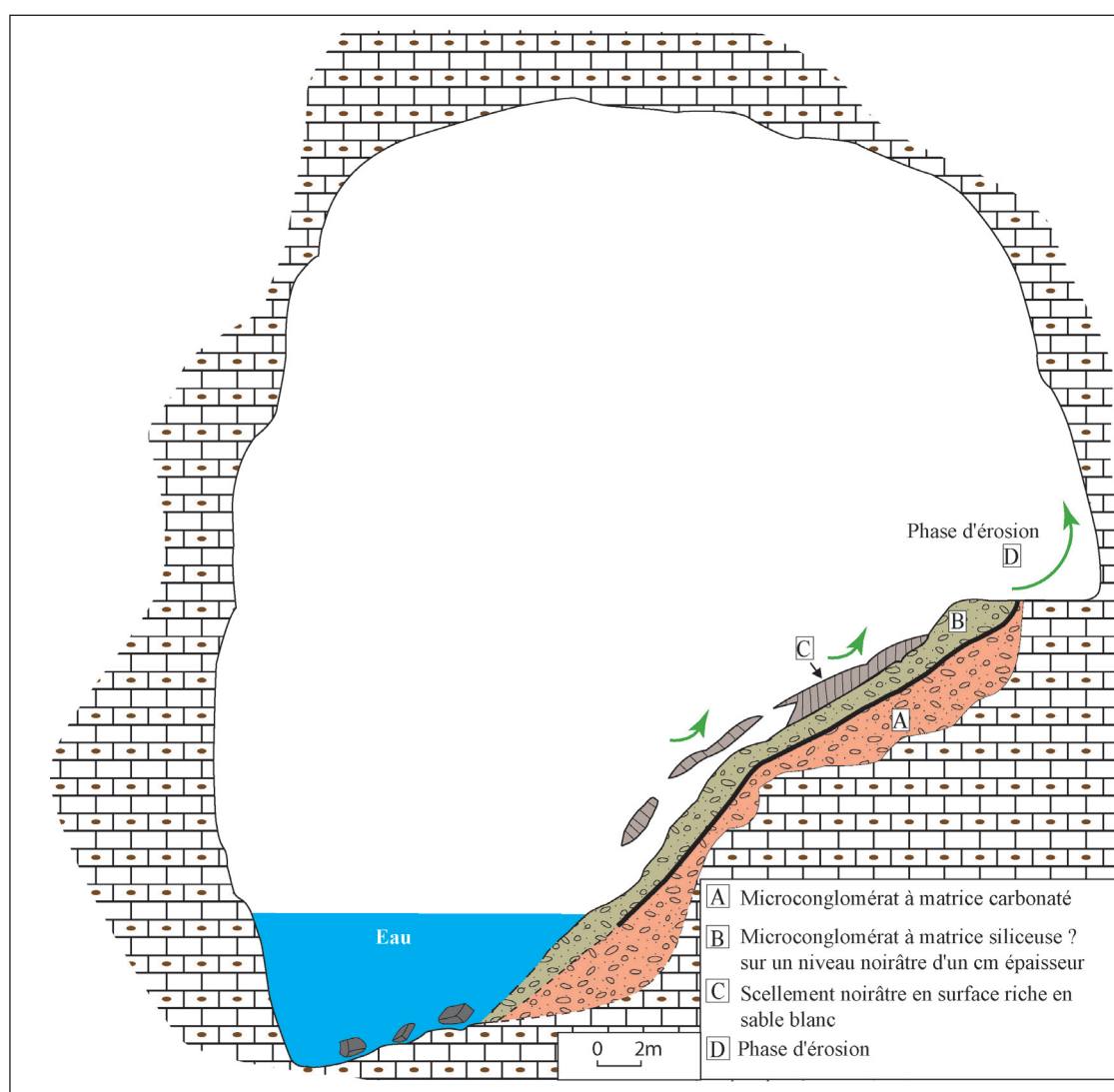


Figure 5.7 : Coupe de la galerie ouest de l'étage inférieur (coupe CC') de la grotte du Chameau.

2.4. Coupe DD'

La coupe de la galerie sud de l'étage inférieur révèle quatre étapes de la mise en place (figure 5.8) :

- A : mise en place d'un microconglomérat à matrice carbonatée, ce qui témoigne de la présence d'un régime noyé, ensuite un dépôt noirâtre d'une faible épaisseur traduit le passage à un milieu « vadose » ;
- B : mise en place d'un microconglomérat à matrice siliceuse ;
- C : mise en place d'un scellement noirâtre riche en sable ;
- D : phase d'érosion en régime noyé qui s'applique sur l'ensemble des formations, ceci explique l'absence des formations stalagmitiques (génération I) présentes dans la coupe EE' ;



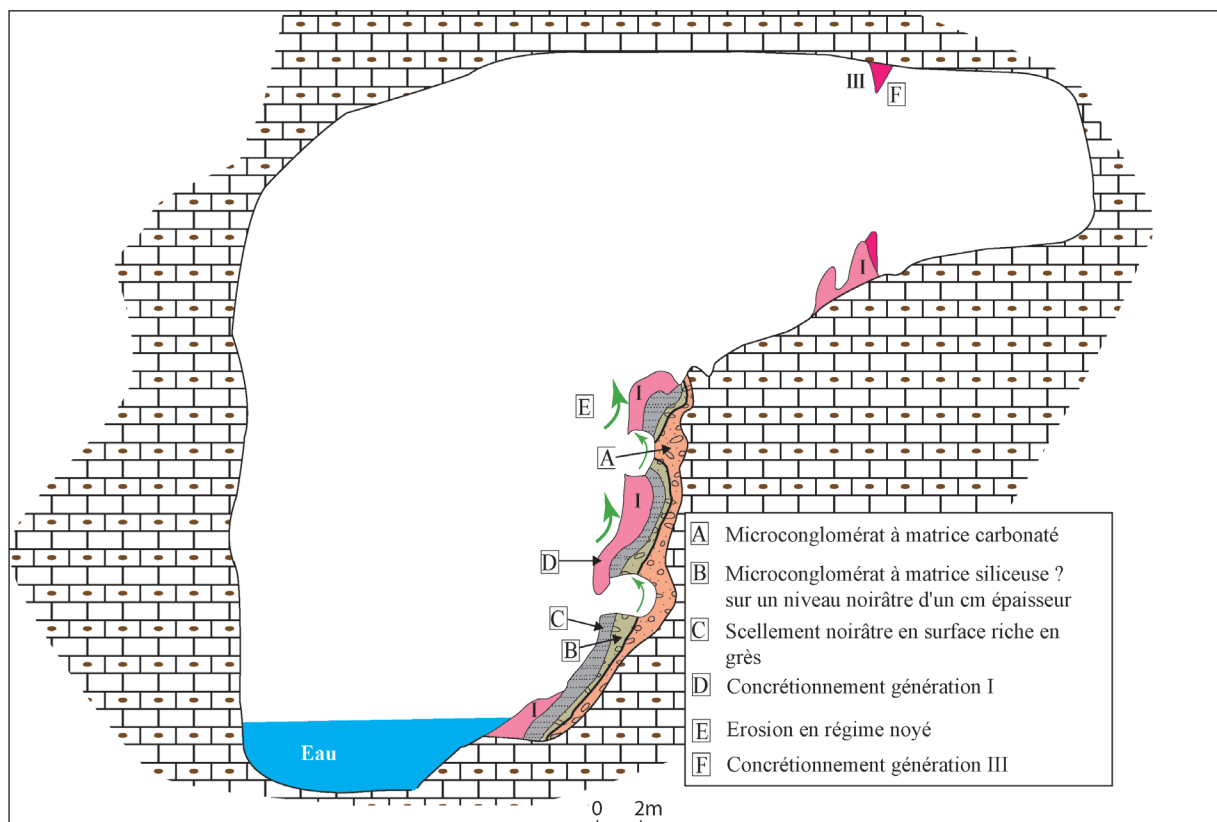
Légende : cf. figure 5.7

Figure 5.8 : Coupe dans la galerie sud de l'étage inférieur (coupe DD') de la grotte du Chameau.

2.5. Coupe EE'

La cartographie de la coupe de la partie amont de la rivière de la grotte du Chameau permet de distinguer cinq étapes (figure 5.9) :

- A : mise en place d'un microconglomérat à matrice carbonatée. Ce remplissage témoigne de l'existence d'un régime noyé. Un dépôt noirâtre d'une faible épaisseur traduit le passage à un milieu « vadose » ;
- B : mise en place d'un microconglomérat à matrice siliceuse qui révèle l'existence des conditions de remplissage différentes par rapport à la phase A ;
- C : mise en place d'un scellement noirâtre riche en grès qui vient épouser les remplissages de la phase B ;
- D : les importants édifices stalagmitiques (première génération) qui reposent sur des formations noirâtres, impliquent le passage à un « régime vadose »,
- E : phase d'érosion en régime noyé s'appliquant sur l'ensemble des dépôts et se traduisant par une altération généralisée;
- F : une deuxième génération de concrétions se développe (génération III).



Légende : cf. figure 5.8

Figure 5.9 : Coupe dans la partie amont de la rivière dans la galerie sud de l'étage inférieur (coupe EE') de la grotte du Chameau.

Les relevées cartographiques montrent qu'une grande partie du réseau souterrain montre une spéléogénèse de type noyé avec des plafonds emboîtés à la voûte, des parois intensément corrodées, des stalagmites et des planchers stalagmitiques érodées. De nombreux conduits portent la trace d'un creusement fluvial en régime noyé avec de nombreux conduits circulaires souvent tapissés de cupules d'érosion et des remplissages d'origine externe. Ces formes et formations témoignent de l'existence d'un régime noyé à plusieurs reprises. Des datations sont en cours pour appréhender les étapes de l'évolution de la grotte de Chameau avec plus de précision.

3. Comparaison de la composition pétrographique des sables : surface/souterrain

L'eau qui circule dans les conduits karstiques de la grotte est vraisemblablement infiltrée par les plateaux karstifiés de Béni Bou Yàala, Aril Nyaal, Aril Acham, etc. Afin de mettre en avant la relation surface/réseau souterrain une confrontation entre la composition pétrographique des dépôts de surface (oued My Idris, oued Ferrouj et Dolines d'Arhil Nyaàla) et les dépôts souterrains (étage inférieur de la grotte) a été menée (cf. tableau 1.1). Cette étude montre que les sables déposés dans les conduits karstiques contiennent des minéraux provenant des roches schisteuses et granitiques (le socle) : micas blancs, schistes, grès du Trias, quartz, etc. Des morceaux de calcaires sont aussi présents. La présence de fer est liée au processus de la décarbonatation.

4. Synthèse et interprétations

4.1. A l'échelle des conduits karstiques

La création des vides karstiques dépend directement de l'organisation du drainage souterrain et de l'évolution de celui-ci. En fonction du contexte hydrogéologique (zone vadose / zone noyée), les conduits se développent et évoluent de manière différente : dans la zone noyée, la dissolution s'exerce sur le pourtour du conduit, ce qui donne avec le temps une morphologie plus au moins « tabulaire » (figure 5.10, A [cas de l'étage intermédiaire]). Dans la zone « vadose » les écoulements et la dissolution s'exercent uniquement à la base du conduit. Ces conditions permettent de créer des galeries « longiformes » (figure 5.10, B [cas de l'étage supérieur]). La cartographie morphogénèse permet de distinguer deux formations de remplissages souterrains (figure 5.10, D) : les formes détritiques qui sont apportées dans le karst souterrain par les eaux d'infiltration (argiles) ou les pertes (galets arrondis, éboulis) et les spéléothèmes qui présentent des indices révélateurs de phases d'équilibre écologique. L'identification de spéléothèmes permet de définir les différentes générations de concrétionnements présentes dans la cavité (trois générations) (figure 5.10, F). La présence de ces formes et formations endokarstiques est l'expression d'un transit de matière au sein de la masse karstique, lié d'une part, aux modes d'infiltration, et d'autre part, aux conditions environnementales extérieures, les phases froides sont associées aux dépôts détritiques et les périodes humides aux spéléothèmes (QUINIF, 1991).

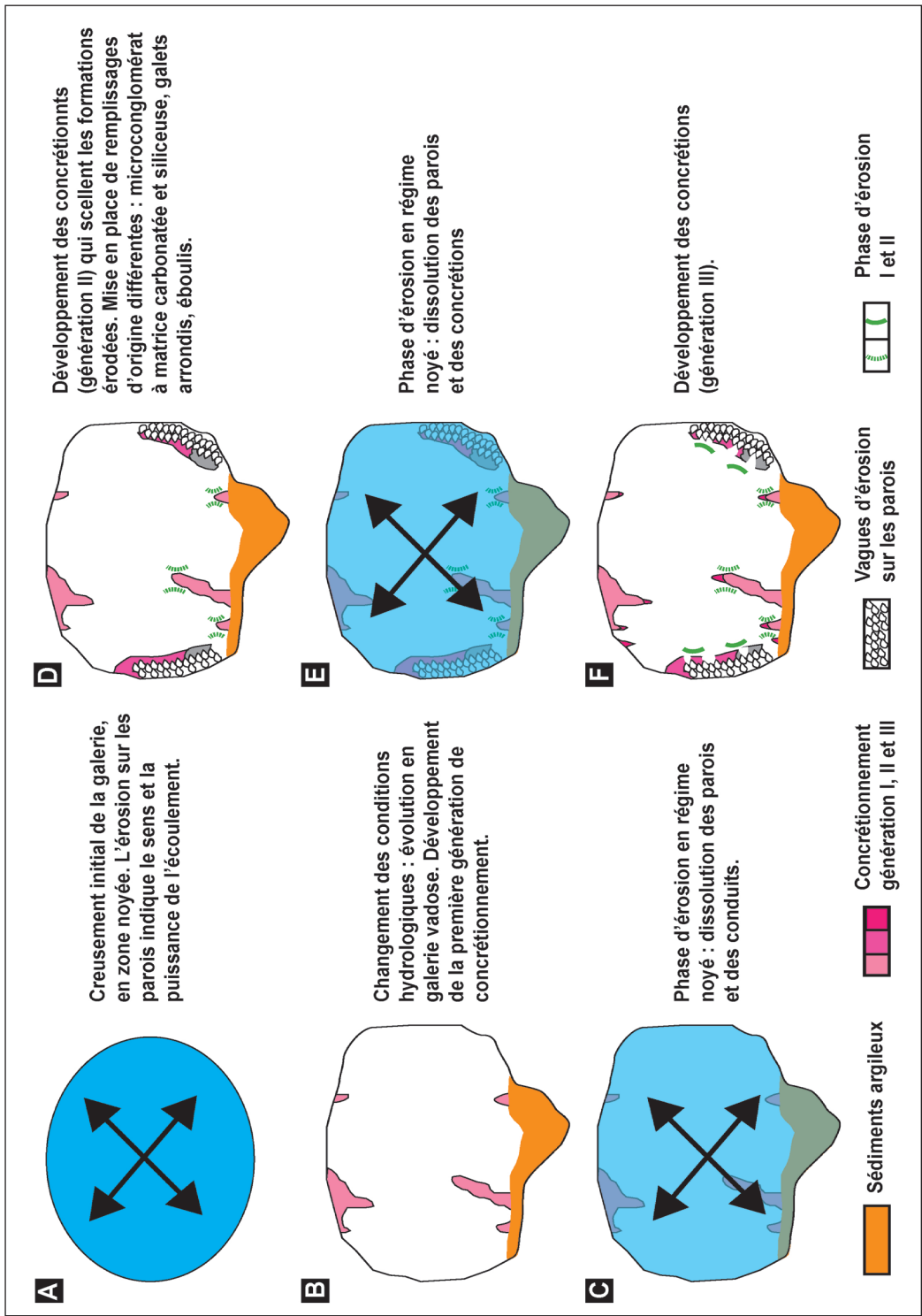


Figure 5.10: Synthèse génétique des formes et formations de la grotte de Chameau. Il s'agit ici d'une galerie idéalisée, représentation de l'ensemble des conduits de la galerie.

La signature « hydrogéologique » dans la morphologie des conduits souterrains est intéressante, elle permet de mettre en avant la migration fréquente du niveau de base par l'identification de différentes phases d'altérations des concrétionnements et des remplissages (figure 5. 10).

L'étude de la relation karstification souterraine et réseau hydrographique permet de comprendre l'évolution temporelle de l'évolution du système. Les relevés cartographiques effectués dans la grotte du Chameau ont permis de mettre en avant les six grandes phases de genèse de la cavité (figure 5.10 A, B, C, D, E et F), donc la cartographie morphologique des formes et des formations endokarstiques, se révèle un support intéressant pour travailler sur la genèse de la grotte (DELANNOY et al., 2001).

4.2. A l'échelle de la grotte du Chameau

La reconnaissance des différentes familles et générations de formes et formations endokarstiques au travers de la cartographie souterraine a permis de proposer une première reconstitution de la grotte du Chameau (figure 5.11) :

1- Etape génétique : drainage souterrain des plateaux calcaires permettant le creusement initial de la grotte du chameau en donnant naissance à l'étage supérieur. Cette étape (phase A, figure 5.11) est à l'origine du paléo-talweg de l'oued Ferrouj.

2- Etape de dessèchement : le développement d'importants édifices stalagmitiques laisse supposer le passage à un régime « vadose » et, par la même, un enfoncement d'un niveau de base hydrographique (phase B, figure 5.11).

3- Etape d'érosion en régime noyé : le changement des conditions hydrogéologiques a permis le passage à un régime noyé et la mise en place des coupoles des plafonds et une forte érosion des concrétionnements dans l'étage supérieur (phase C, figure 5.11).

4- Etape d'assèchement : l'abaissement de niveau de base hydrologique a engendré une évolution en galerie « vadose ». La mise en place d'un tablier d'éboulis d'origine externe dans l'étage intermédiaire témoigne de l'existence d'une paléo-entrée, ensuite une deuxième génération de concrétionnements se développe (phase D, figure 5.11).

5- Etape de fonctionnement en perte de l'oued : la cartographie morphologique révèle la mise en place, dans l'étage inférieur, d'un remplissage fluvial composé de galets arrondis très émoussés. Ceci traduit l'existence d'une paléo-exutoire actuellement comblé (phase D, figure 5.11).

6- Etape de reprise d'érosion en régime noyé : un nouvel épisode d'envolement a permis l'altération généralisée des parois, des concrétionnements et des remplissages (phase E, figure 5.11).

7- Etape de vidange définitive : l'encaissement fluvial traduit le creusement de l'étage actif. Plusieurs relevés indiquent la mise en place d'une nouvelle série de concrétions (génération III), actuellement toujours sub-actives (phase F, figure 5.11).

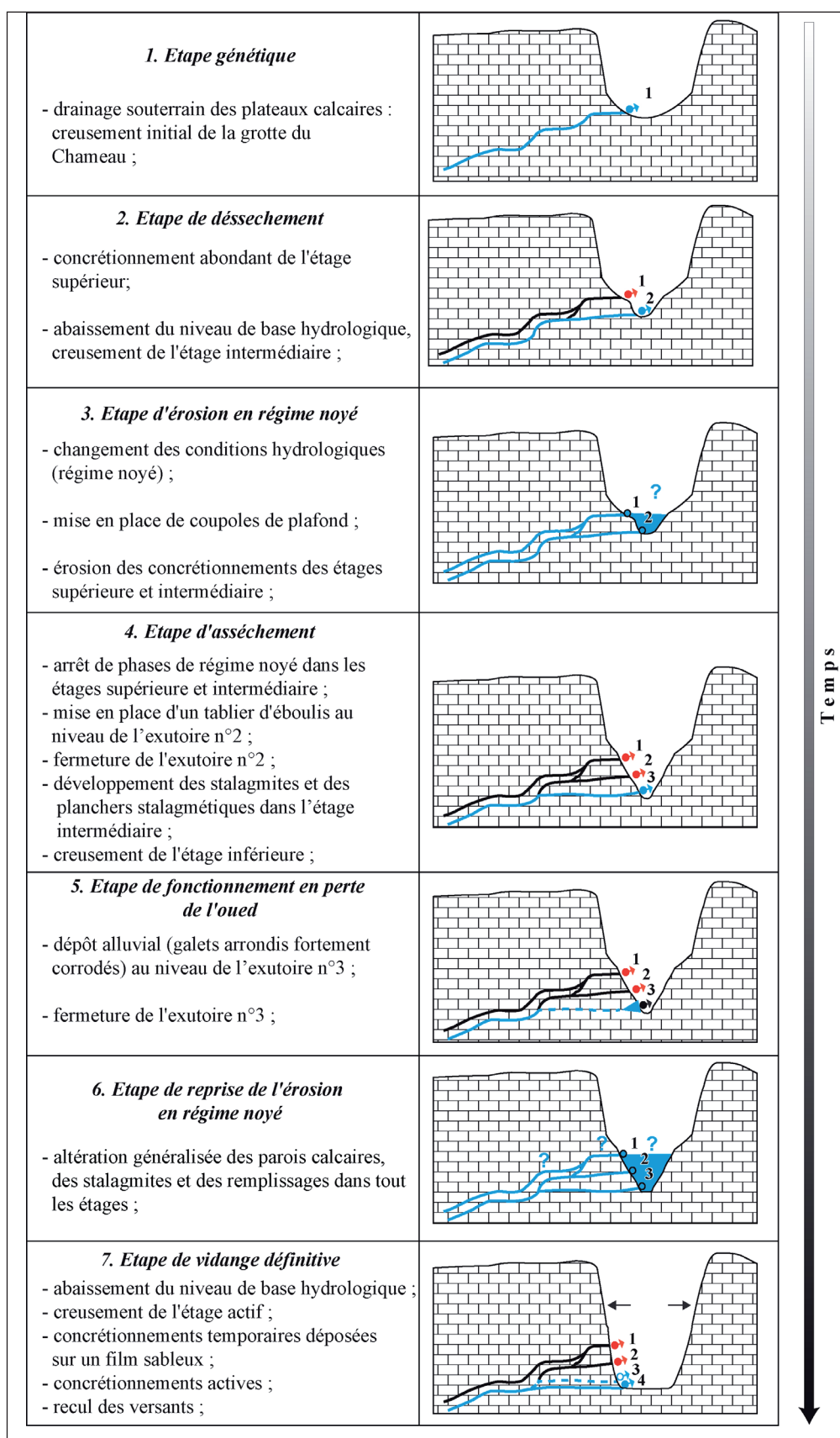


Figure 5.11 : Evolution de la grotte du Chameau à partir des indices morphologiques relevés grâce à la cartographie souterraine.

Conclusion

Ce chapitre avait pour but de montrer l'intérêt du karst souterrain en tant que mémoire naturelle, ici sur une échelle de temps longue. En se basant sur des sites clés, la cartographie morphogénique a permis la proposition d'une première reconstitution paléo-environnementale de la grotte du Chameau. Sept phases de reconstitutions ont été identifiées : (i) phase génétique qui a permis le creusement initial de la grotte sous un régime noyé ; (ii) première phase de dessèchement favorisant le développement de la première génération de concrétionnement ; (iii) phase d'érosion en régime noyé permettant l'érosion des parois calcaires et des concrétionnements ; (iv) phase d'assèchement produite par l'abaissement de niveau de base. Ceci a permis la mise en place des formations d'origine externe à l'étage intermédiaire : éboulis ; (v) phase de fonctionnement en perte de l'oued a engendré la mise en place d'un remplissage fluviatile à l'étage inférieur ; (vi) phase de reprise de régime noyé a provoqué une altération générale de formes et formations endokarstiques et (vii) phase de vidange définitive permettant la mise en place d'une nouvelle génération de concrétionnement.

Des prélèvements de concrétions ont été réalisés dans la cavité afin de contraindre ces différentes phases génétiques. Ces résultats ne sont pas encore soumis à ce jour et ne permettent pas pour l'instant de cerner correctement cette analyse temporelle.

Cette démarche a permis la proposition d'une reconstitution d'évolution temporelle à l'échelle du Quaternaire. Afin d'appréhender l'évaluation temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques, une étude à l'échelle d'un siècle sera menée dans le chapitre six. Cette analyse permettra de mettre en évidence l'interaction entre conditions naturelles et actions anthropiques.

CHAPITRE 6

ANALYSE TEMPORELLE (TEMPS COURT) DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES

Pour comprendre l'évolution temporelle de la vulnérabilité des ressources en eau en milieu semi aride méditerranéen et notamment les eaux karstiques, sensibles aux activités anthropiques et aux conditions climatiques variables, nous proposons une étude diachronique. Elle vise à appréhender l'évolution de la vulnérabilité et les paramètres pesant sur la fragilisation du système notamment vis à vis de la recharge. Cette étude diachronique a permis l'appréciation de différents facteurs intervenant dans la vulnérabilité des ressources en eau en milieu karstique et de mettre en avant leurs interactions. Cette approche appliquée a donc pour but de croiser les données environnementales et anthropiques variables qui interviennent d'une façon directe ou indirecte dans la dégradation des ressources en eau.

Comme nous l'avons montré auparavant (cf. introduction générale), la vulnérabilité des eaux karstiques dans le milieu semi-aride s'exprime par la sécheresse chronique de certaines sources et la turbidité des eaux. Il s'est donc avéré nécessaire de se focaliser sur la zone de l'impluvium, là où les conditions d'infiltration sont susceptibles de contrôler, en grande partie, la recharge du karst profond (VIAS *et al.*, 2006). Les paramètres contrôlant cette vulnérabilité sont d'ordre (i) géologiques et géomorphologiques, (paramètres d'état : fixes à l'échelle du temps de notre travail), (ii) climatiques, (iii) bio-pédologiques et (iv) anthropiques. Ces trois derniers paramètres sont des paramètres variables à l'échelle du temps de l'analyse. Ceci permet de mener une étude diachronique pour appréhender l'évolution temporelle du système, d'une part, et de mesurer le poids de chacun des paramètres dans l'évolution de la vulnérabilité selon les périodes d'observation, d'autre part. Ces paramètres sont évalués à partir (i) des données de la bibliographie : carte pédologique (BOUMEAZA, 1985), cartes géologiques de Berkane et Ahfir (MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES DIRECTION DE LA GÉOLOGIE 2001, 2004), cartes de végétation : Taourirt 1/200 000 (Institut Géographique National, 1946), Oujda 1/200 000 (Institut Géographique National, 1949), Berkane 1/200 000 (INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL, 1954), Berkane 1/100 000 (DIRECTION DE LA CONSERVATION FONCIÈRE ET DES TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES, 1970), et cartes de Berkane et El Ayoune (DIRECTION RÉGIONALE DES EAUX ET FORÊTS 1997A, 1997B), photos aériennes et satellites (Google Earth) ; les données pluviométriques des stations climatiques de la région nord est du Maroc. Les séries pluviométriques étant très lacunaires, nous avons fait appel à différentes bases de données pour les compléter : base de données numérique (http://meteo.infospace.ru/wcarch/html/e_sel_stn.sht?adm=143) (cf. annexe 16a); base de données cartographiques (GAUSSEN *et al.*, 1958) (cf. annexe 16b) et (ii) des travaux universitaires et des mesures de terrain.

1. Approche diachronique de la vulnérabilité

Pour appréhender la vulnérabilité de la ressource en eau karstique, une approche diachronique a été menée. Cette étude se focalise sur trois périodes clés pendant lesquelles les paramètres variables du système ont subi un changement profond. Les méthodes cartographiques qui existent sont statiques (CUCCHI *et al.*, 2007; DOERFLIGER *et al.*, 1996, 1998; JEANNIN *et al.*, 2001; PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000; PLAGNES *et al.*, 2006; VIAS *et al.*, 2006). L'intérêt de l'application de cette approche est d'ajouter la notion de *l'évolution temporelle* dans l'évaluation de la vulnérabilité des ressources naturelles afin de rendre compte de l'influence des pratiques et des actions anthropiques dans la fragilisation ou au contraire du renforcement du système.

2. Méthode

La méthode développée consiste en une approche diachronique, effectuée en quatre étapes

(TAYEBI *et al.*, 2011) :

- (i) - décomposition du système de la vulnérabilité des eaux des sources karstiques en sous-systèmes indépendants : géologie, géomorphologie, précipitations, sols, végétation et activités anthropiques (cf. figure 6.1) ;
- (ii) - évaluation des sous-systèmes à caractères variables (Précipitations, végétation, activités anthropiques). La variation temporelle de ces paramètres influence la répartition spatiale des aires de vulnérabilité ;
- (iii) - zoom sur des périodes clé pendant lesquelles le système a subi un changement radical. A l'échelle de l'analyse, les conditions socio-économiques et les actions politiques, sont généralement, à l'origine d'une transformation profonde du milieu ;
- (iv) - assemblage des différents sous-systèmes pour mettre en avant les interactions des sous-systèmes et pour obtenir la carte globale de la vulnérabilité (figure 6.1).

Cette approche permet d'apprécier l'évaluation temporelle et l'interaction des sous systèmes contrôlant l'infiltration et la recharge des aquifères karstiques.

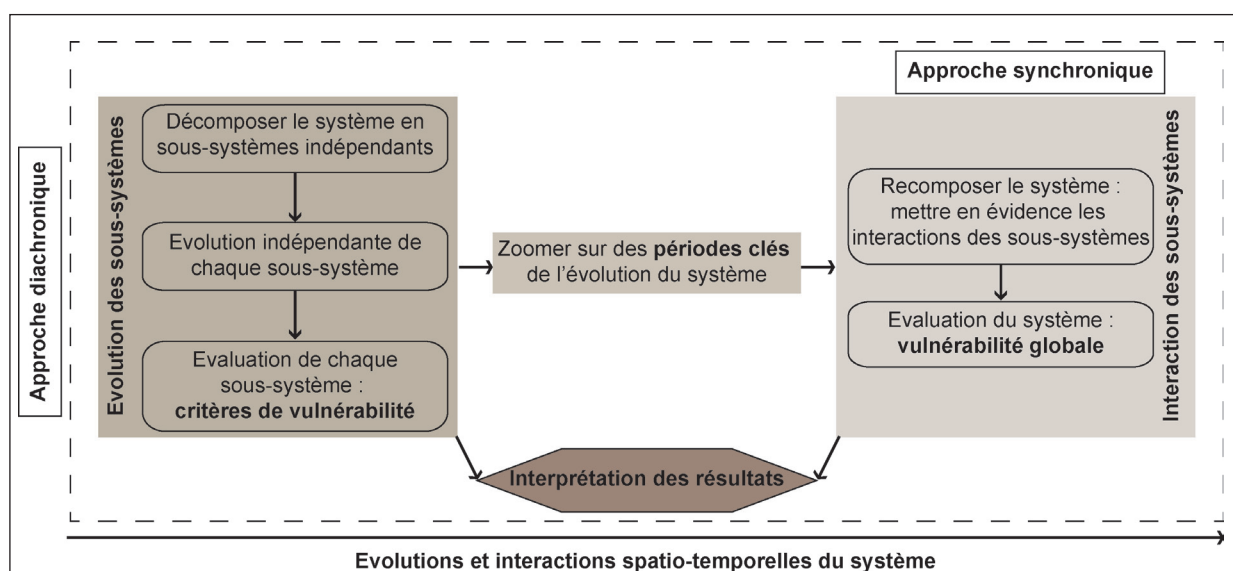


Figure 6.1 : Etapes de la réalisation d'une approche diachronique pour l'appréciation de l'évolution temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques.

3. Evaluation du milieu

L'évaluation du milieu se focalise sur les trois paramètres variables à l'échelle de notre approche : (i) « Précipitations », (ii) « Infiltration » avec notamment l'évolution du critère « couvert végétal » et (iii) « Activité anthropiques ». Ce dernier agit sur les critères suivants : « pente » par la construction des terrasses agricoles ; « sol » et « couvert végétal » par la fragilisation (coupe de bois, déstabilisation de la couverture pédologique) ou au contraire par la protection de ces ressources naturelles par le reboisement, la mise en place des anti-érosifs, etc. ; « formes géomorphologiques » par la perméabilisation de l'impluvium et la destruction de l'écosystème végétation/sol/formes géomorphologiques (TAYEBI, 2007). L'homme par ses actions passées et actuelles favorise donc soit le renforcement du milieu soit au contraire, accélère la dégradation des ressources naturelles déjà fragilisées par les conditions naturelles du milieu.

Il est important de noter qu'en ce qui concerne le critère sol, nous ne disposons pas de données pour évaluer son évolution temporelle. La carte pédologique de BOUMEAZA (1985) sera utilisé pour les trois périodes de référence.

3.1. Précipitations

L'approche appliquée, met en avant l'impact de l'irrégularité du régime pluviométrique et son intensité sur l'alimentation des aquifères karstiques. Ces deux critères reflètent, en particulier, la quantité totale de précipitations, la fréquence, la durée et l'intensité des événements pluvieux. Ces caractéristiques peuvent avoir une influence majeure sur la quantité, le mode et la nature de l'infiltration.

Pour spatialiser les deux critères pluviométriques (fréquence et intensité) et pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude, nous nous sommes basés sur les données enregistrées dans les six stations suivantes : Berkane, Tafouralet, Ain Almou, Slimania, El Ayoun et Oujda. Le choix de ces deux dernières stations (situées au sud de la zone d'étude) s'est imposé par manque de séries complètes des stations approximatives. L'éloignement de ces deux stations agit sur l'interpolation des données et amplifie l'influence des flux secs provenant du sud.

3.2. Occupation du sol (couvert végétal et activités anthropiques)

La situation actuelle du massif des Béni Snassen est le résultat des différentes phases d'évolution du territoire depuis l'époque pré-coloniale. Quatre périodes ont été identifiées : (i) pré-coloniale, (ii) coloniale, (iii) postcoloniale et (iv) actuelle. Une synthèse géographique et historique s'est avérée nécessaire pour comprendre l'origine des changements socio-économiques et de l'organisation spatiale du territoire (tableau 6.1) (LAOUINA, 1987 ; ZOUHRI, 1989).

Période précoloniale (avant 1907)	Période coloniale (1907 ¹ /1956)	Période post coloniale(1960/1980)	Période actuelle (1990/2010)
Complémentarité montagne/plaine : -maîtrise du milieu par l'homme ; -maintien de l'équilibre entre la population et les ressources naturelles ;	Rupture de l'équilibre traditionnel : -blocage du déplacement de la population et des troupeaux ; -surexploitation des ressources naturelles ; -disparition des formes d'entraide et de solidarité dans le travail ; -apparition de l'appropriation des terres et disparition de la gestion collective ; -émigration temporaire des jeunes montagnards vers les fermes coloniales (Algérie et plaine des Triffa)	Fragilisation du milieu : -explosion démographique ; -dégradation importante des ressources naturelles : érosion intense, manque d'entretien des pratiques anti-érosives... -émigration définitive vers l'étranger, les plaines agricoles et les grandes villes ; -disparité spatiale de la répartition de la population en montagne ; -marginalisation de la montagne	Enjeux de développement territorial : -conscience de la dégradation des ressources naturelles ; -actions politiques, administration économique pour le maintien de la population locale ; -développement de nouvelles activités économiques : tourisme dans les Béni Snassen et la plaine des Triffa (Saidia)

Tableau 6.1 : Les quatre périodes du changement socioéconomique et territorial dans les Béni Snassen (1907-2010).

La figure 6.2 montre l'évolution dynamique spatiale des Béni Snassen et son environnement. Cette évolution est marquée par quatre périodes majeures :

- 1 - la période pré-coloniale (avant 1907) :** le territoire était organisé autour d'une montagne peuplée, dans laquelle la population locale appliquait des pratiques adaptées au milieu. Ceci a favorisé la maîtrise du milieu et le maintien de l'équilibre ressources naturelles/population. L'avant-pays et le littoral présentaient des territoires vides à l'exception des passages des nomades Arabes et le pâturage dans le piémont ;
- 2 - la période coloniale (1907/1956),** dont l'objectif principal était, en premier lieu, le contrôle du territoire et l'exploitation des ressources (bois, productions agricole et animales). Ceci a introduit une première rupture de l'équilibre traditionnel par le développement de la culture en plaine, le blocage de déplacement de la population et des troupeaux, la surexploitation des ressources naturelles, la disparition des formes d'entraide et de solidarité dans le travail, l'apparition de l'appropriation des terres et disparition de la gestion collective, l'émigration temporaire des jeunes montagnards vers les fermes coloniales (Algérie et plaine des Triffa) ;
- 3 - la période post-coloniale (1960/1980) :** une fragilisation du milieu s'est produite à cause de l'explosion démographique, ce qui a provoqué l'extension des superficies cultivées sur des terrains pointus et non adaptés afin de subvenir aux besoins croissants. Ces comportements ont engendrés la dégradation importante des ressources naturelles : déforestation, défrichement, érosion intense, etc. L'émigration définitive des montagnards vers l'étranger, les plaines agricoles et les grandes villes a conduit au manque d'entretien des pratiques anti-érosives et des zones fragiles. Enfin, ces Changements ont produit une organisation nouvelle de l'espace et une disparité spatiale de la répartition de la population en montagne ;
- 4 - la période actuelle (1990/2010)** présente des enjeux de développement territorial majeurs. Ces enjeux se traduisent par la conscience de la dégradation des ressources naturelles. Ce qui nécessite l'application des mesures adaptées au milieu afin d'assurer la préservation, la protection et la gestion durable des ressources. La disparité de la répartition spatiale de la population locale, nécessite l'application des actions politiques, administratives et économiques pour le maintien de la population locale. Pendant cette période, la région connaît le développement de nouvelles activités économiques et notamment le tourisme vert dans les Béni Snassen et le développement de stations balnéaires (Saidia) sur la côte méditerranéenne.

Ces phases majeures ont eu des répercussions importantes sur l'environnement et par conséquent sur l'évolution de la vulnérabilité. Au cours de ces trois phases de mutation, le sous critère « occupation du sol » a été profondément modifié (dégradé et/ou renforcé). La comparaison de l'évolution du système s'est effectuée en se basant sur les trois périodes suivantes : les années 1940 (colonisation française : rupture de l'équilibre traditionnel), les années 70 (explosion démographique et changement du mode de vie socio-économique), les années 2000 (existence de deux situations contradictoires : conscience de la dégradation des ressources naturelles versus enjeux majeurs de développement économique et territorial).

1. Colonisation de la région orientale du Maroc.

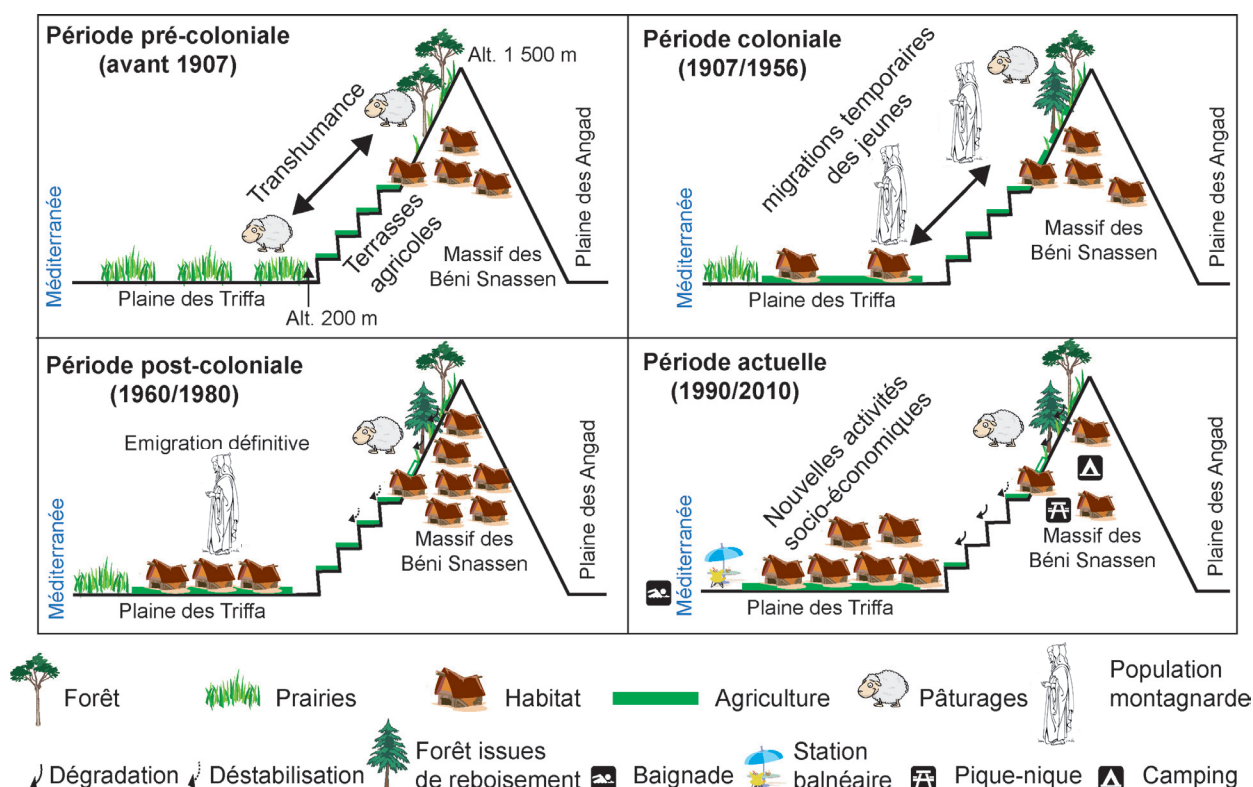


Figure 6.2 : L'évolution des dynamiques spatiales des Béni Snassen de la période précoloniale jusqu'à la période actuelle.

4. Implications cartographiques

4.1. Précipitations

Trois périodes d'observation ont été évaluées : période 1925/1949, période 1970/1980 et enfin période 2001/2004, selon les deux critères « Quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique »

Période 1925/1949

Critère « quantité des précipitations »

La répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du paramètre « précipitation » (figure 6.3) montre que l'ensemble de la zone d'étude est caractérisé par une vulnérabilité moyenne (les moyennes interannuelles enregistrées sont entre 400 et 500 mm). La station Tafouralet enregistre la moyenne interannuelle la plus élevée (485 mm/an). La station d'Ain Almou enregistre 471 mm, et enfin la station de Berkane enregistre une valeur de 398 mm/an. La station de Slimania reçoit une moyenne de 350 mm/an. Les stations situées au sud enregistrent des moyennes interannuelles faibles : 342 mm/an à Oujda et 268 mm/an à El Youne.

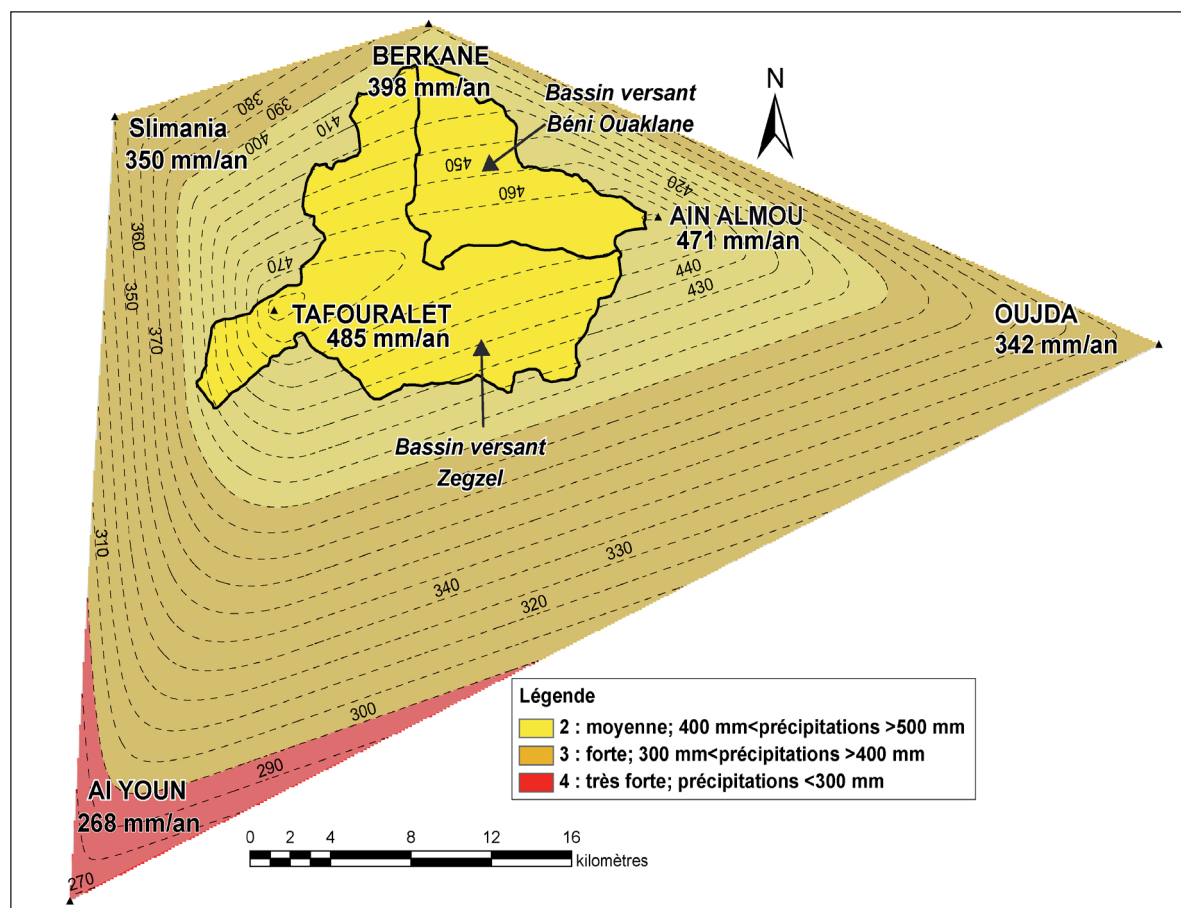


Figure 6.3 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « quantité des précipitations » de la région nord est du Maroc (1925/1949).

Critère « Intensité pluviométrique »

L'étude du critère « intensité pluviométrique » permet d'apprécier l'influence de l'irrégularité des précipitations et sa nature. L'observation de la carte permet de distinguer les deux classes de vulnérabilité (figure 6.4) :

1 - Classe de moyenne vulnérabilité dans laquelle l'intensité pluviométrique varie de 10 à 15. Ces valeurs correspondent à la zone entre Tafouralet (10,3) et Ain Almou (10,4).

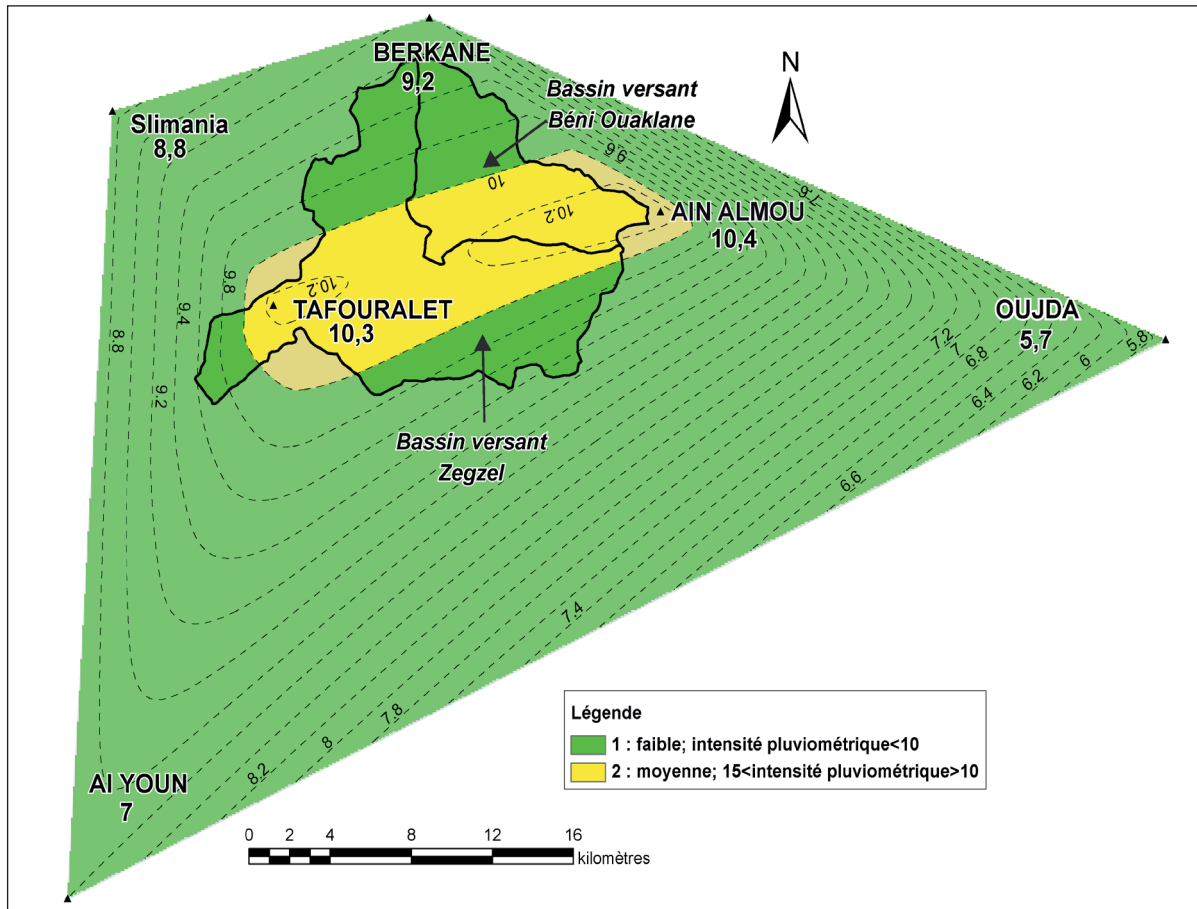
2 - Classe de faible vulnérabilité dans laquelle l'intensité pluviométrique est inférieure à 10 (Berkane 9,2, Slimania 8,8, Al Youn 7 et Oujda 5.7).

La forte intensité pluviométrique favorise le ruissellement et limite l'infiltration et par conséquent la recharge karstique.

L'obtention de la carte P « Précipitations » (1925/1949)

L'obtention de la carte « Précipitation » consiste à croiser les deux couches d'information « Quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique » en donnant un poids deux fois plus important au dernier critère. Ce choix est lié à la forte intensité pluviométrique et au caractère orageux des précipitations en milieu méditerranéen semi-aride (cf. chapitre 4).

L'observation de la figure 6.5 montre l'existence de trois indices de vulnérabilité : faible, fort et très fort. Cette répartition est liée d'une part au facteur de pondération accordé aux couches d'informations et aux degrés de vulnérabilité de ces classes (cf. chapitre 4). A l'échelle de la zone d'étude deux degrés de vulnérabilité sont à distinguer :



(Intensité pluviométrique : $\sum P / \text{Nb de jours de pluie}$)

Figure 6.4 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1925/1949).

- 1 - faible vulnérabilité : elle est le résultat de l'interaction des deux critères « quantité des précipitations » et « intensité pluviométrique » présentant les degrés de vulnérabilité moyen et faible. Le rôle du facteur de pondération attribué au critère Intensité est lisible. Cette zone correspond à 88 km² de la superficie totale des deux bassins versants ;
- 2 - très forte vulnérabilité résultant du croisement de la zone de moyenne vulnérabilité en fonction de l'intensité pluviométrique et de l'aire de moyenne vulnérabilité en fonction de la quantité des précipitations. Le poids deux fois plus important de la première couche explique les degrés de vulnérabilité. Cette zone présente 101 km² des deux bassins versants investis.

Le contact des aires de faible et très forte vulnérabilité est justifié, d'un côté, par la quantité des précipitations enregistrées pendant la période d'observation (inférieure à 500 mm, ce qui donne une vulnérabilité moyenne) et d'autre côté par l'importance de l'intensité pluviométrique (supérieure à 10, ce qui s'exprime par une vulnérabilité moyenne). Le fait que le « système de pondération » donne un poids deux fois plus important au sous critère intensité, les zones de croisement des aires d'intensité pluviométrique supérieure à 10 et celles des précipitations inférieures à 500 mm passent en rouges (très forte vulnérabilité). Dans ces zones les pluies sont rares et de caractère orageux par rapport aux zones voisines (en vert) qui enregistrent une faible intensité pluviométrique (inférieure à 10).

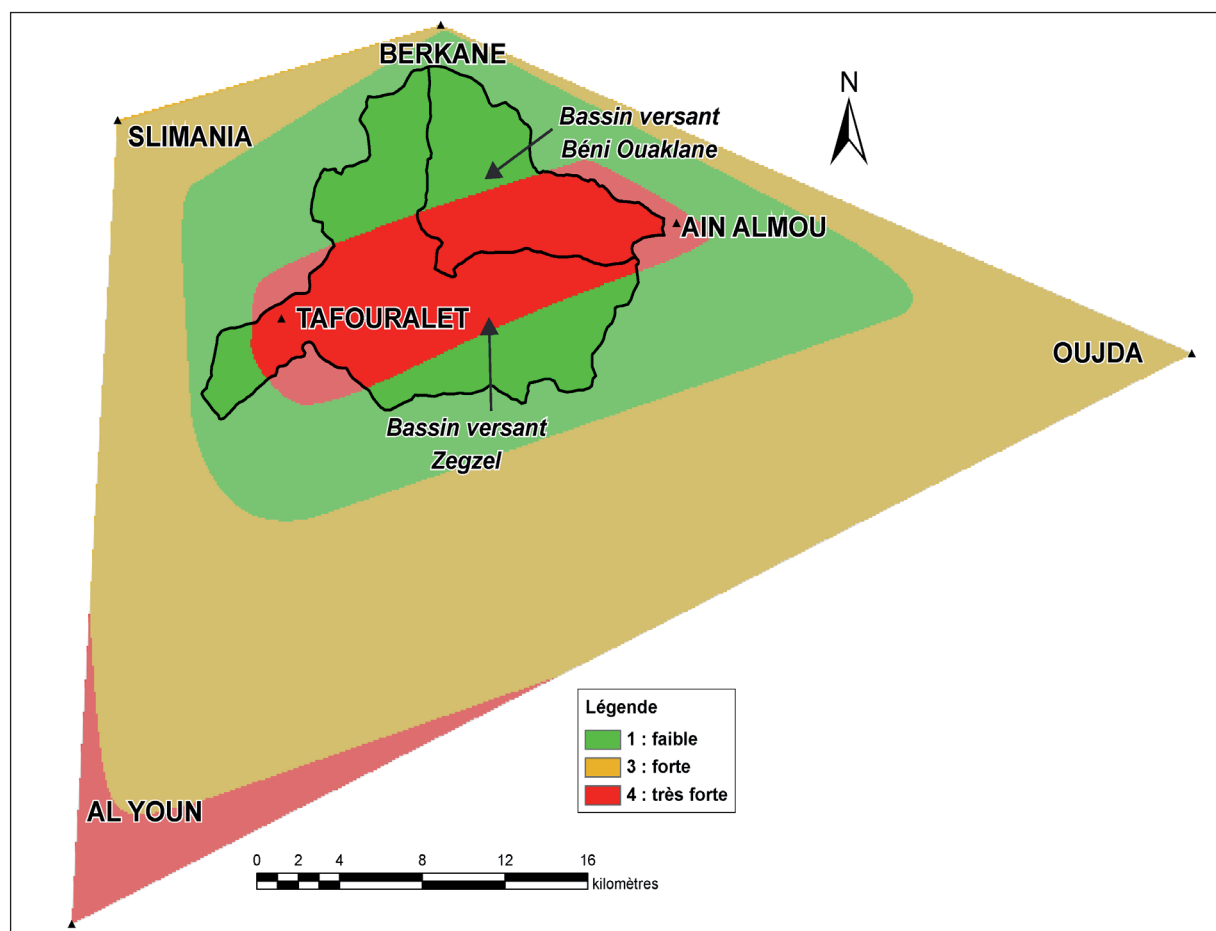


Figure 6.5 : Carte de vulnérabilité du paramètre « précipitation » en fonction du croisement des sous critères « quantité des précipitation » et « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1925/1949).

Période 1970/1980

Critère « quantité des précipitations »

La carte de la répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du paramètre « précipitation » (figure 6.6) pour la période d'observation 1970/1980 illustre l'existence de quatre classes de la vulnérabilité :

- (i) - les zones de faible vulnérabilité qui reçoivent une moyenne interannuelle supérieure à 500 mm, correspondent aux stations situées en altitude : Tafouralet 605 mm/an et Ain Almou 564 mm/an ;
- (ii) - les zones de moyenne vulnérabilité dans lesquelles la moyenne interannuelle des précipitations est entre 400 et 500 mm : Berkane 435 mm/an ;
- (iii) - les zones de forte vulnérabilité sont les zones qui enregistrent une moyenne interannuelle entre 400 et 300 mm : Slimania 365 mm/an et Oujda 345 mm/an ;
- (iv) - les zones de très forte vulnérabilité correspondent aux zones qui enregistrent une moyenne interannuelle inférieure à 300 mm : Al Ayoun 284 mm/an.

A l'échelle de la zone d'étude deux classes de vulnérabilité sont rencontrées : faible et moyenne vulnérabilité

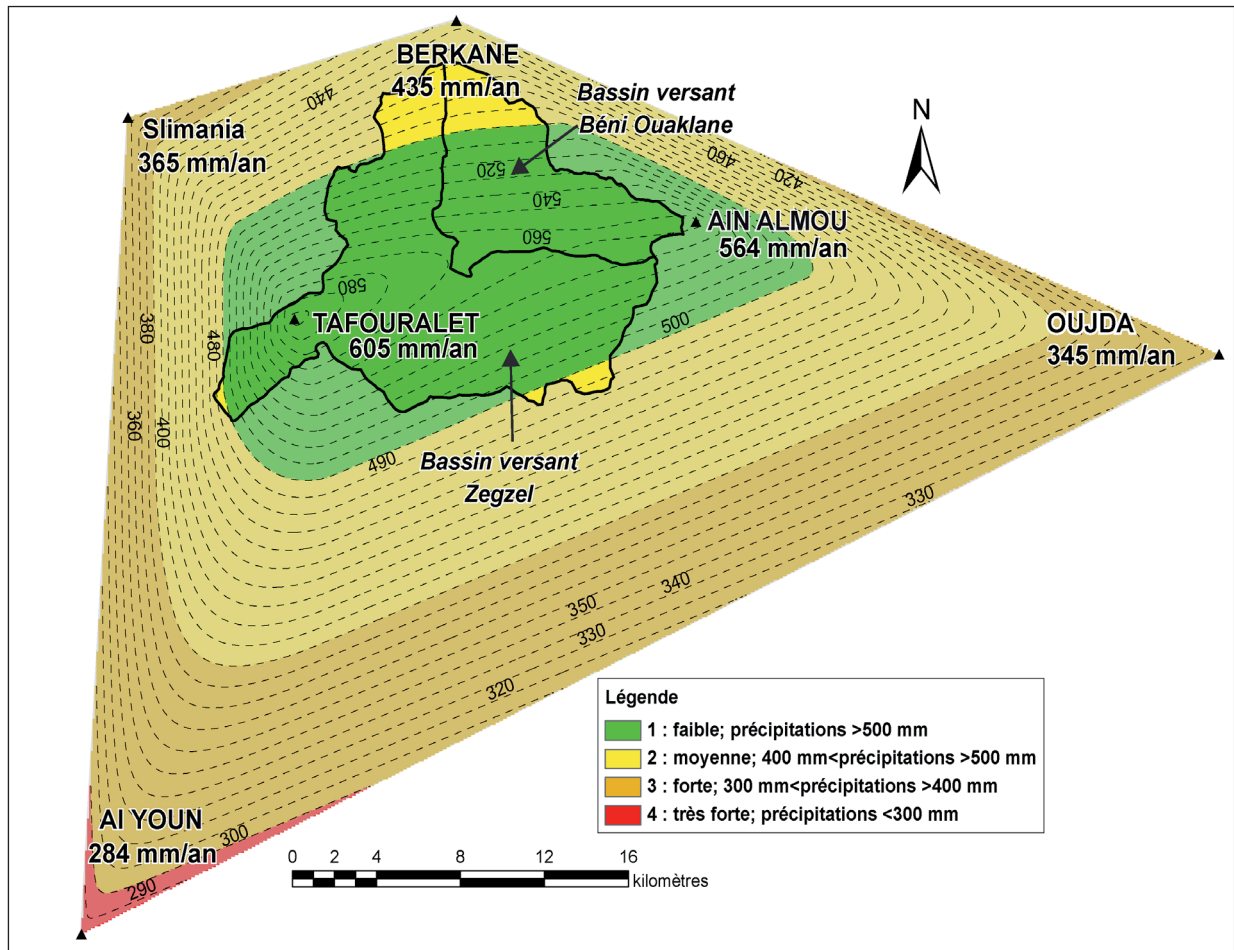


Figure 6.6 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « quantité des précipitations » de la région nord est du Maroc (1970/1980).

Critère « Intensité pluviométrique »

En appliquant la classification d'évaluation des indices de vulnérabilité de l'intensité pluviométrique (cf. tableau 3.2), la période d'observation 1970/1980 est caractérisée par une faible vulnérabilité (tableau 6.2). Ceci donne une vulnérabilité uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude.

Tableau 6.2 : Intensité pluviométrique de la région nord est du Maroc (1970/1980).

Stations	Intensité pluviométrique
Berkane	7
Tafouralet	9,8
Ain Almou	9,9
Slimania	8
Oujda	5
Al Youn	6

(Intensité pluviométrique : $\sum P / \text{Nb de jours de pluie}$)

L'obtention de la carte P « Précipitations » (1970/1980)

La carte de vulnérabilité en fonction du paramètre « Précipitation » permet de distinguer quatre classes de vulnérabilité allant de faible à forte (figure 6.7). A l'échelle des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane, deux classes de vulnérabilité sont observées :

- 1 - zone de faible vulnérabilité correspondant aux zones qui enregistrent des précipitations supérieures à 500 mm/an et qui se caractérisent par une intensité pluviométrique inférieure à 10. Cette zone couvre une superficie de 169 km² de la zone d'étude ;
- 2 - zone de moyenne vulnérabilité présentant le croisement des deux couches d'information : les zones qui reçoivent entre 300 et 400 mm/an et les zones caractérisées par une intensité pluviométrique faible. Cette zone occupe 21 km² de l'ensemble de la zone d'étude.

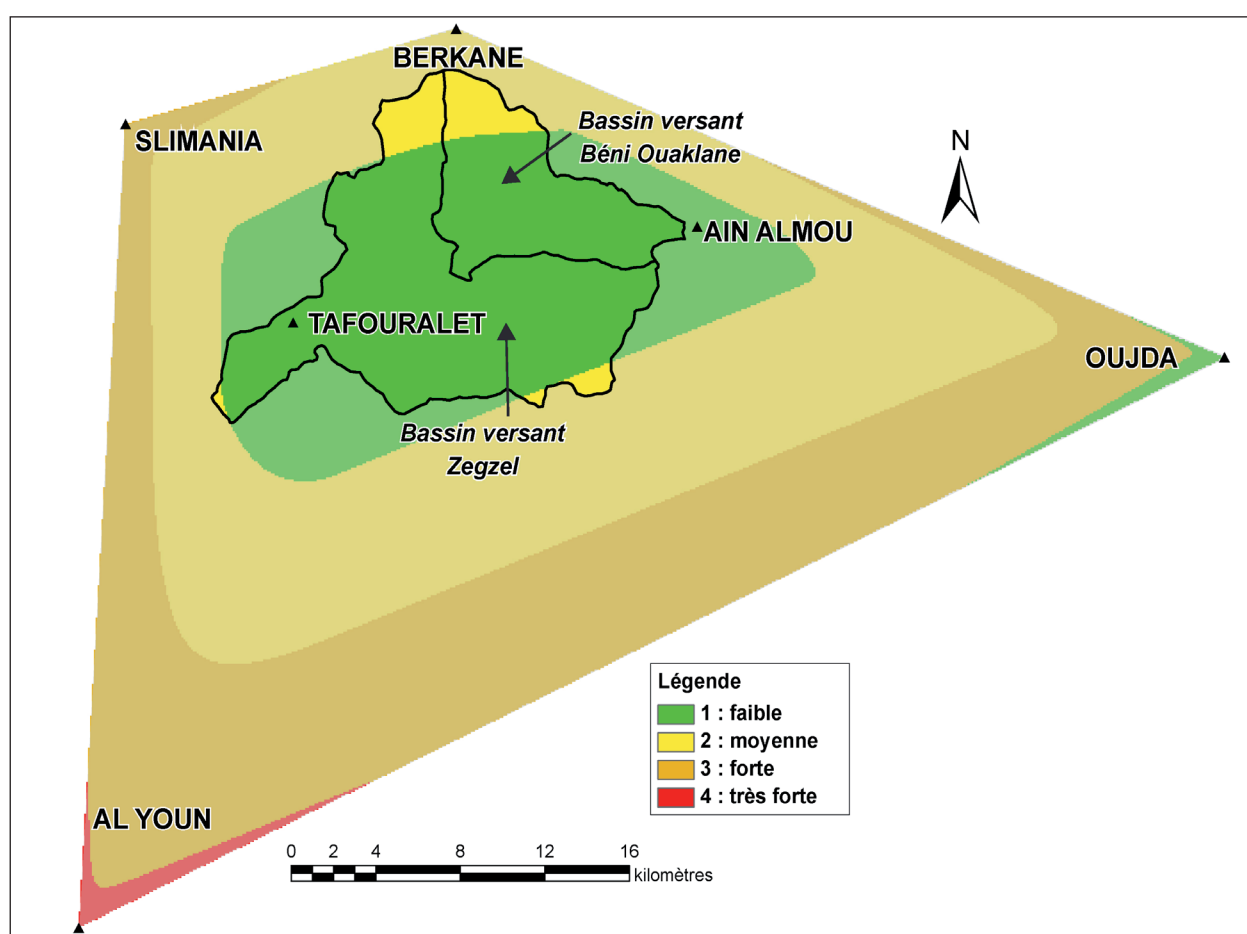


Figure 6.7 : Carte de vulnérabilité du paramètre « Précipitation » en fonction du croisement des sous critères « quantité des précipitation » et « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1970/1980).

Période 2001/2004

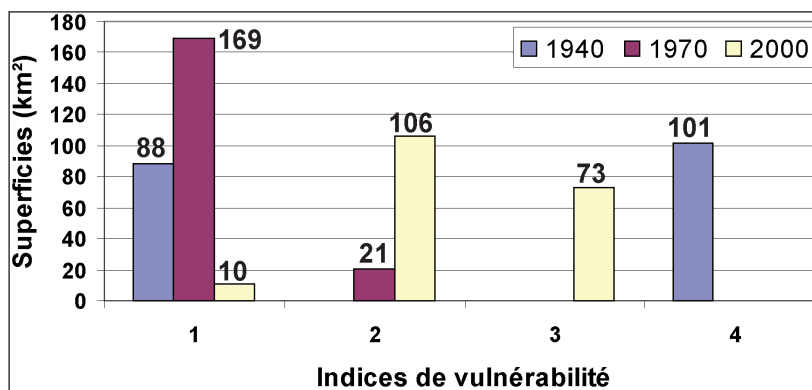
Cette période a été traitée dans le chapitre trois. De façon synthétique on peut dire que pour cette période, trois classes de vulnérabilité sont à distinguer à l'échelle de l'application : (i) zone de faible vulnérabilité, couvrant une superficie de 10 km², (ii) zone de moyenne vulnérabilité présentant une superficie de 106 km² et (iii) zone de forte vulnérabilité qui correspond à 73 km² de la superficie totale de la zone d'étude (cf. figure 5.8).

Comparaison des trois périodes d'observation

L'étude comparative du paramètre « précipitation » met nettement en évidence la grande variation spatio-temporelle des deux critères « Quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique » (figure 6.8).

L'analyse statistique montre que la période d'observation 1970/1980 présente la vulnérabilité globale du paramètre « P » la plus atténuée. Ceci est lié à (i) la fréquence des précipitations (moyennes interannuelles supérieures à 500 mm/an pour les stations de Tafouralet et Ain Almou [605 et 565 mm/an respectivement]) et (ii) la faible intensité pluviométrique (inférieure à 10). En revanche, la période d'observation 1925/1949 présente une vulnérabilité élevée à cause d'une part des faibles précipitations (moyenne interannuelle inférieure à 500 mm/an pour les stations les plus arrosées Tafouralet [485 mm/an] et Ain Almou [471 mm/an]), la forte intensité pluviométrique (supérieure à 10 pour les stations de Tafouralet et Ain Almou) amplifie la vulnérabilité d'autre part. La période d'observation 2001/2004 englobe trois classes de vulnérabilité : faible avec seulement 10 km², moyenne avec 106 km² et forte avec 73 km².

Figure 6.8 : Comparaison temporelle (années 1940, 1970 et 2000) de la répartition spatiale du paramètre « Précipitations ».



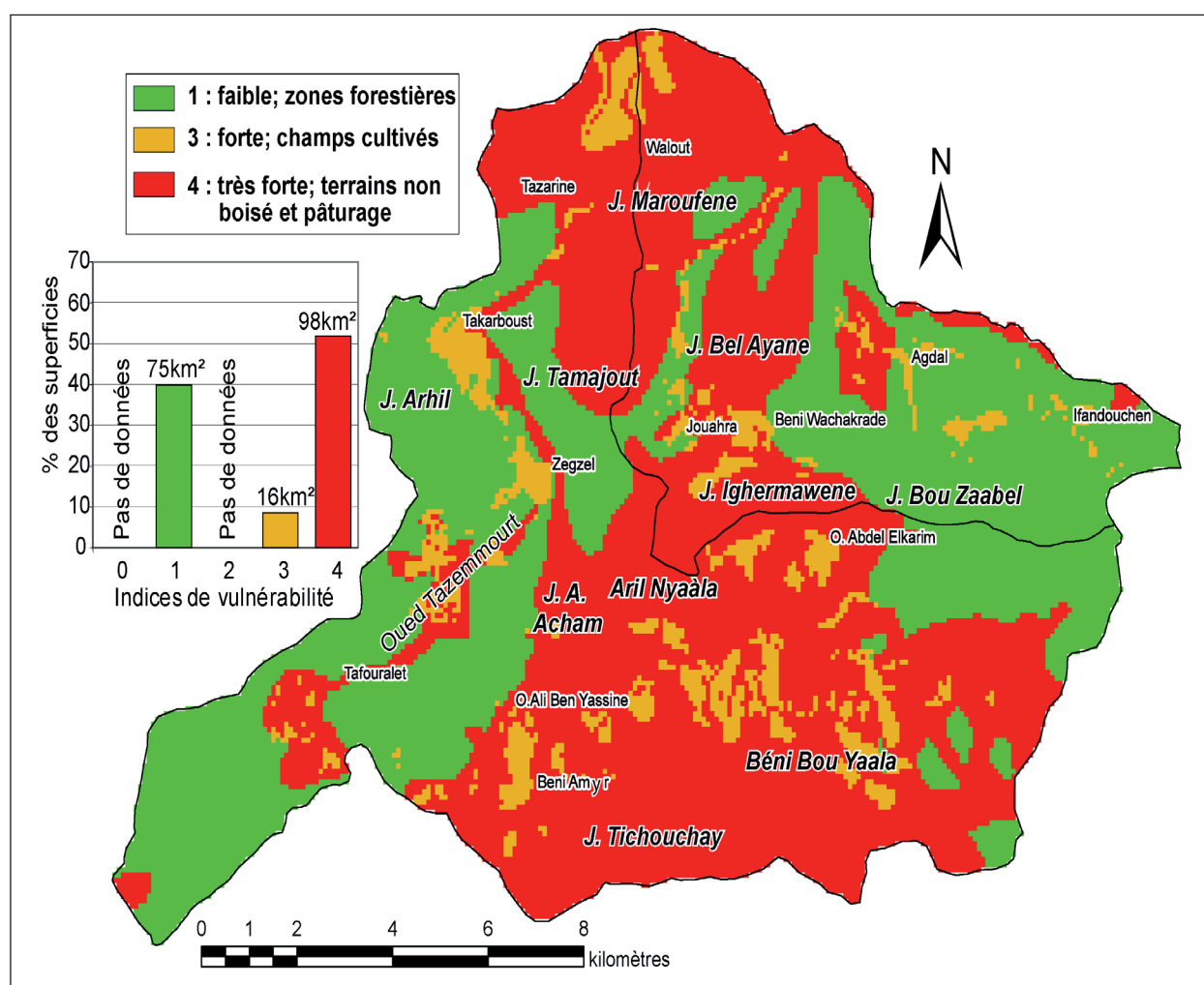
4.2. Occupation du sol

Dans le cadre de l'évaluation temporelle de la vulnérabilité des aquifères karstiques, l'occupation du sol (couvert végétal et activités anthropiques) permet d'apprécier l'évolution temporelle du paramètre « Infiltration ». L'homme par ses actions passées et actuelles participe à la modification du poids joué par les sous critères « pente » et « occupation du sol » dans l'évolution de la vulnérabilité. La construction des terrasses agricoles par la population sédentaire (avant le XIX^{ème} siècle) a permis le changement de la pente. Les zones aménagées favorisent une infiltration lente et assurent la préservation des sols. Actuellement, certaines terrasses sont mal entretenues voire dégradées (soit à cause de l'exode rural, soit à cause du changement d'activité économique) (cf. chapitre 2). La forêt est également un espace touché par les conditions socio-économiques et les actions politiques (cf. chapitre 2). L'explosion démographique, l'exploitation des ressources naturelles, les missions de reboisement, l'application de nouvelles lois de gestion de la forêt, etc. ont fortement influencé la répartition spatiale du couvert forestier. Afin de mettre l'accent sur l'évolution temporelle du paramètre occupation du sol, l'approche est donc menée sur trois périodes différentes : les années 1940, 1970 et 1997. L'évaluation est basée sur la classification proposée pour l'évaluation du sous critère « occupation du sol » (cf. tableau 3.8). Il est important de noter que les cartes des années 1940 et 1970 ne donnent pas d'informations concernant la densité du couvert forestier. Pour faire face à ce manque de données et rester homogène entre les trois cartes, nous attribuons l'indice « faible vulnérabilité » au couvert forestier à toutes les cartes évaluées.

Période des années 1940

L'évaluation du couvert forestier et les activités anthropiques des années 1940 permettent d'obtenir trois classes de vulnérabilité (figure 6.9) :

- 1 - les zones de faible vulnérabilité couvrent les zones forestières qui présentent une superficie de 75 km² de l'ensemble de la zone d'étude ;
- 2 - les zones de forte vulnérabilité correspondent aux champs cultivés d'une superficie de 16 km² ;
- 3 - les zones de très forte vulnérabilité présentent la superficie la plus importante avec 98 km². Elles sont associées aux terrains non boisés et zones de pâturage.



Afin d'apprécier la répartition spatiale du paramètre « Infiltration » les facteurs de pondération de la combinaison B ont été appliqués (cf. figure 3.19). Ce choix est fait dans la mesure où les formes karstiques constituent les points privilégiés de l'alimentation des aquifères karstiques. La combinaison des sous critères composant le paramètre « infiltration » a permis d'obtenir une carte de vulnérabilité qui comporte cinq classes de degrés de vulnérabilité qui varient de très faible à très forte (figure 6.10) :

- (i) - l'indice de très faible vulnérabilité correspond au croisement des terrains calcaires et calcaires dolomitiques (karstifiés favorables à l'infiltration et donc à la recharge des

- aquifères karstiques) avec les zones forestières (jbel Arhil, Tafouralet, etc.). Ces zones présentent également les terrains à pente faible (inférieure à 5 %) correspondent aux formations calcaires et dolomitiques (Beni Bou Yaala). L'ensemble a une superficie de 23 km² ;
- (ii) - l'indice de faible vulnérabilité couvre la plus grande superficie de la région étudiée avec une superficie de 68 km². Cet indice correspond au croisement des zones lapiazées favorables à l'infiltration, avec des terrains dans lesquels la pente est entre 15 à 50%, les zones non forestières (jbel Bel Ayane, jbel Tamjout, jbel Tichouchay, etc.), les zones de moyenne pente (entre 5 et 15 %), et les zones forestières et les terrains marno-calcaires (au sud de Tafouralet) ;
- (iii) - l'indice de moyenne vulnérabilité présente les zones de moyenne pente (entre 5 et 15 %) et les surfaces lapiazées et les bassins d'alimentation de formes karstiques végétalisés et qui sont caractérisés par une pente moyenne à forte (exemple Aril Nyaàla et l'amont de l'oued Tazemmourt). La superficie totale de ces zones présente 20 km² ;
- (iv) - l'indice de forte vulnérabilité présente les terrains non karstiques boisés (jbel Bou Zaabel) et les zones non boisées à moyenne et forte pente (sud de Tafouralet). La superficie totale des aires présentant une forte vulnérabilité est de 46 km² ;
- (v) - l'indice de très forte vulnérabilité correspond aux croisements des terrains de nature lithologique imperméables, zones non boisées et pâturées dans lesquelles la pente est supérieure à 15 %. Ces zones sont rencontrées à O. Ali Ben Yassine, Jouahra, O. Abdel Elkrim, etc. Cet indice couvre 25 km².

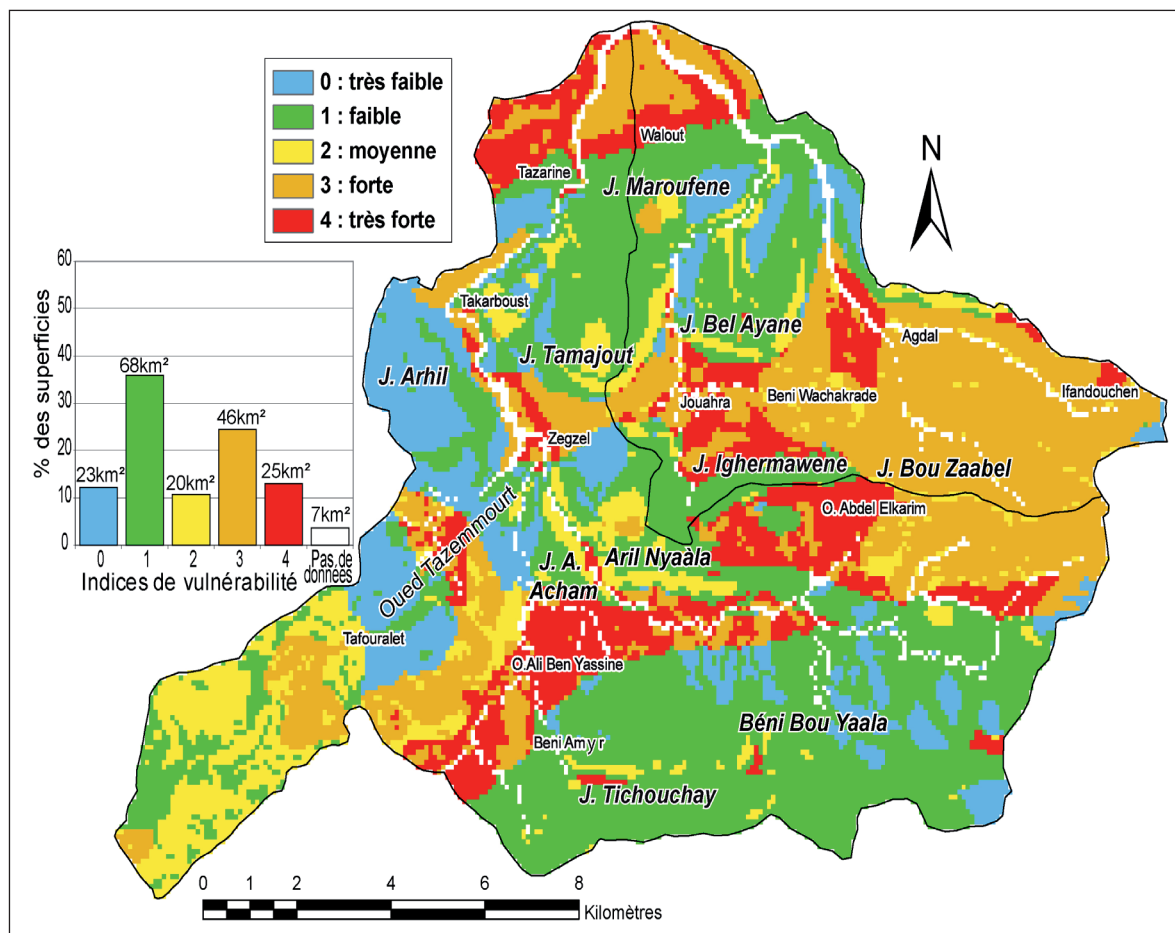


Figure 6.10 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1940.

Période 1970

Pour la période d'observation 1970, la figure 6.11 permet de distinguer trois classes de vulnérabilité :

- 1 - les zones de faible vulnérabilité couvrent les zones forestières qui présentent une superficie de 70 km² de l'ensemble de la zone d'étude ;
- 2 - les zones de forte vulnérabilité correspondent aux champs cultivés dans lesquels la superficie est de 16 km² ;
- 3 - les zones de très forte vulnérabilité présentent la superficie la plus importante avec 104 km². Elles sont associées aux terrains non boisés et aux zones de pâturage.

Cette analyse montre la diminution de la superficie forestière de 5 km² par rapport aux années 1940 malgré les missions de reboisement menées pendant les années 1950 (cf. chapitre 2). Le changement socio-économique profond qui a touché le Maroc à la fin des années 1960 et pendant les années 1970, a provoqué une surexploitation des ressources naturelles et notamment de la forêt. L'évaluation du couvert forestier et des activités anthropiques des années 1970 reflètent l'image de cette dégradation.

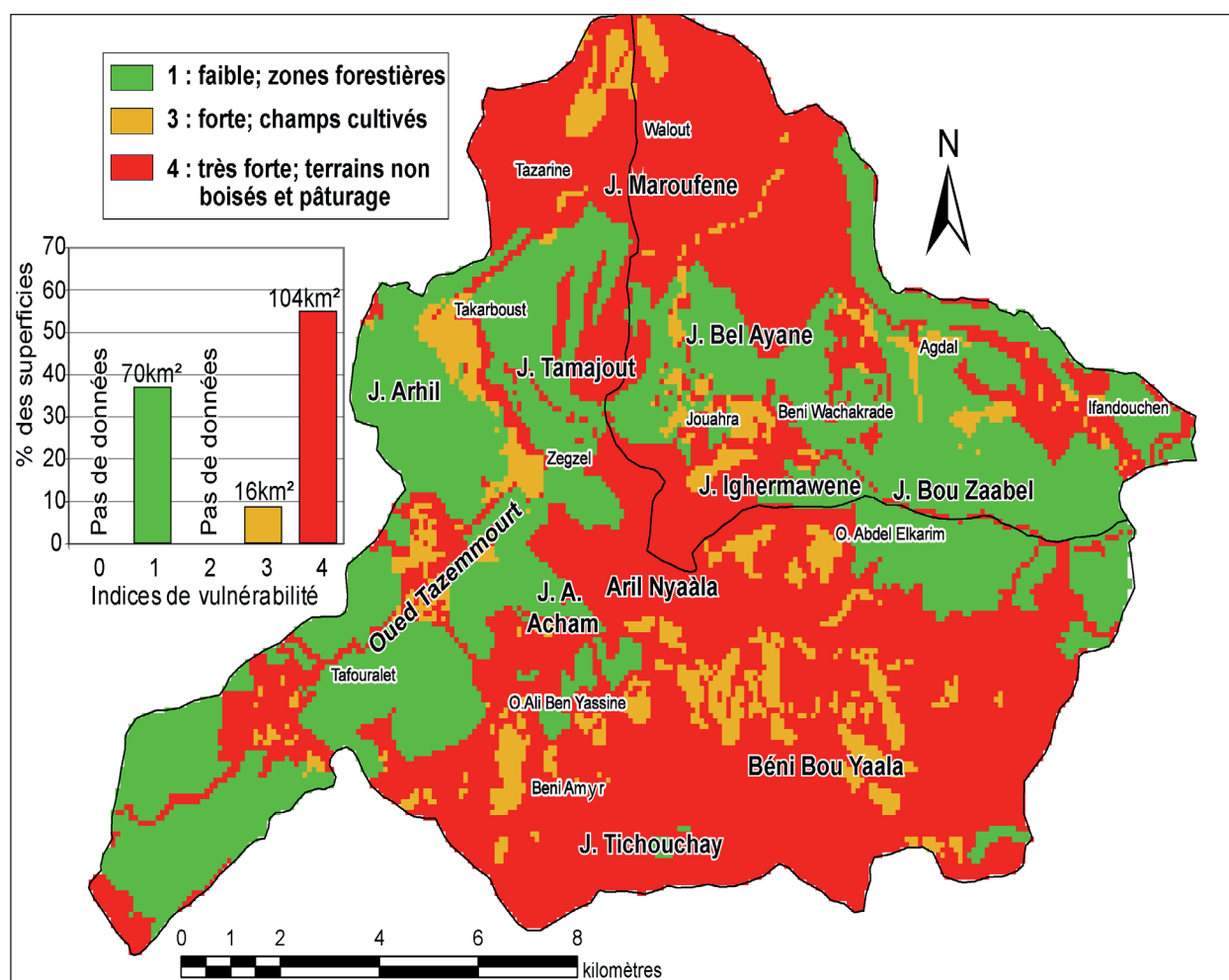


Figure 6.11 : Evaluation du critère « occupation du sol » de la période 1970.

La méthode de combinaison, de pondération, de croisement et d'évaluation est identique à la carte des années 1940. Une différence dans la répartition spatiale des aires de vulnérabilité est identifiée. Cette variation est liée à l'évolution du couvert végétal et des pratiques anthropiques. La carte de vulnérabilité en fonction du paramètre « I » permet de distinguer cinq classes de vulnérabilité (figure 6.12) :

- (i) - l'indice de très faible vulnérabilité couvre une superficie de 24 km². Les reboisements du jbel Aril Acham et jbel Tamjout ont donné une vulnérabilité très faible par rapport à la carte des années 1940, au contraire le déboisement dans les Aril Nyaàla et le sud est des Béni Bou Yaala a diminué l'extension des aires de très faible vulnérabilité ;
- (ii) - l'indice de faible vulnérabilité couvre 67 km² de la superficie de la région étudiée ;
- (iii) - l'indice de moyenne vulnérabilité présente une superficie de 18 km² ;
- (iv) - l'indice de forte vulnérabilité présente une superficie totale de 45 km² ;
- (v) - l'indice de très forte vulnérabilité couvre 29 km² par rapport à 25 km² pendant les années 1940. L'augmentation des zones de défrichement (Ifandouchen, O. Ali Ben Yassine, et Béni

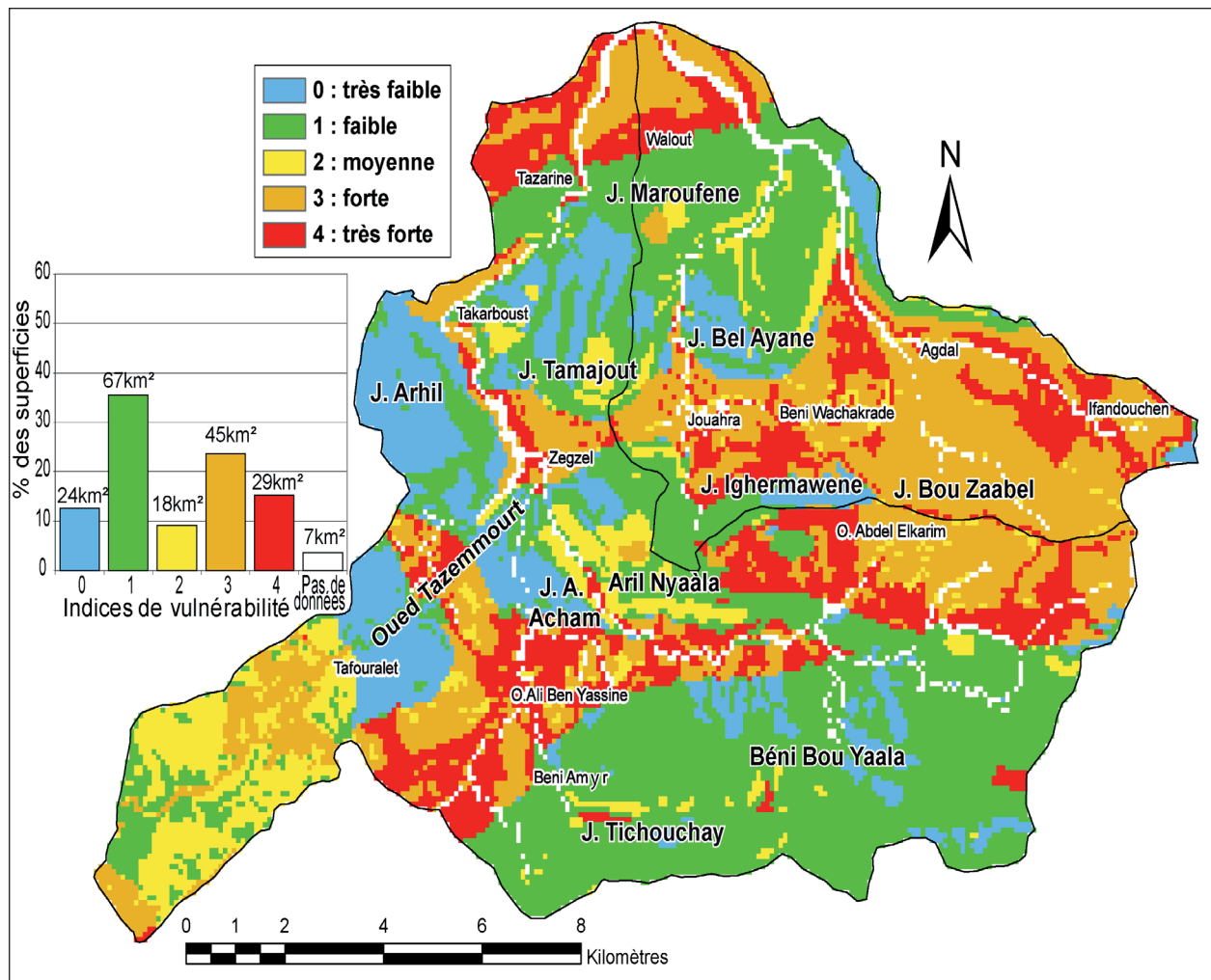


Figure 6.12 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1970.

Bou Yaala) à amplifié la vulnérabilité.

Période 1997

Pour mener à bien la comparaison de l'évaluation du couvert forestier et les activités anthropiques de l'année 1997 avec les périodes précédemment décrites (années 1940 et 1970), nous avons synthétisé la figure 3.17 en attribuant un indice de faible vulnérabilité au couvert forestier, un indice de forte vulnérabilité aux champs cultivés et enfin un indice de très forte vulnérabilité aux terrains non boisés et aux terrains de pâturage (figure 6.13).

- 1 - les zones de faible vulnérabilité sont associées aux zones forestières. Elles présentent une superficie de 107 km² de l'ensemble de la zone d'étude ;
- 2 - les zones de forte vulnérabilité qui présentent la répartition spatiale des champs cultivés couvrent une superficie de 28 km². Cette augmentation est dû au développement des exploitations agricoles au piémont ;
- 3 - les zones de très forte vulnérabilité présentent une superficie de 55 km². Elles sont associées aux terrains non boisés et aux zones de pâturage.

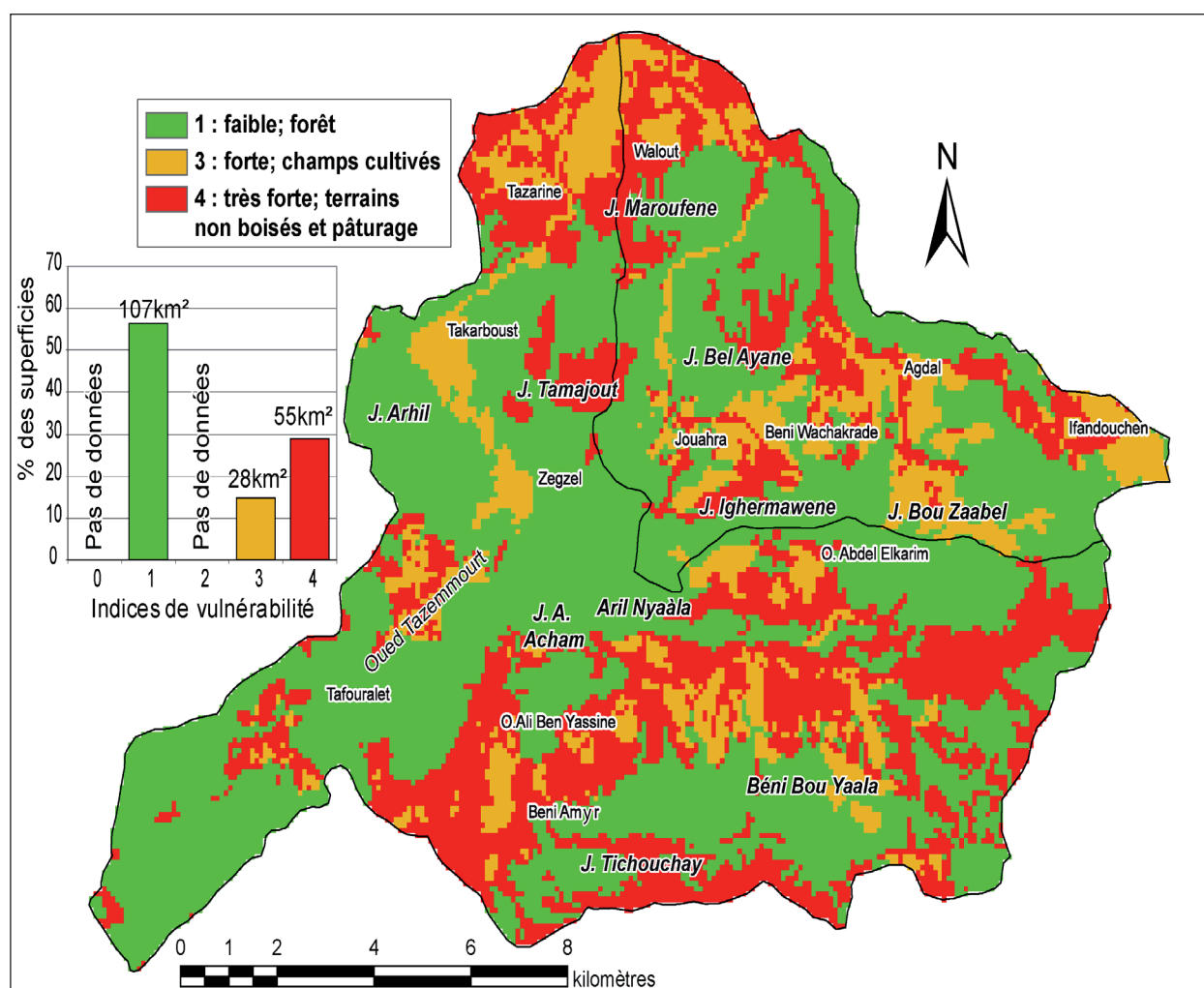


Figure 6.13 : Evaluation du critère « occupation du sol » de la période 1997.

Contrairement à la période d'observation 1970, dans laquelle la surexploitation des ressources naturelles a provoqué une fragilisation du milieu, la carte de vulnérabilité obtenue à partir des données plus récentes (1997) montre le renforcement du « facteur protecteur » de la zone d'étude. Les décisions politiques (reboisement, gestion et protection des ressources forestières) constituent le facteur principal de cette consolidation du milieu. Ce constat permet de mettre le doigt sur l'influence indirecte de l'homme sur l'évolution de la vulnérabilité des ressources naturelles.

La figure 6.14 montre que les aires de très faible vulnérabilité couvrent les 54 km² de l'ensemble de la zone d'étude ce qui a participé à l'atténuation de la vulnérabilité globale en fonction du paramètre « I ». Les zones de faible vulnérabilité présentent 21 km², tandis que les zones de moyenne vulnérabilité occupent 36 km². Les aires de forte et très forte vulnérabilité restent assez élevées avec 42 et 29 km² respectivement. Ceci explique l'existence des zones à protéger afin d'améliorer le « facteur protecteur » du milieu vis-à-vis de l'infiltration.

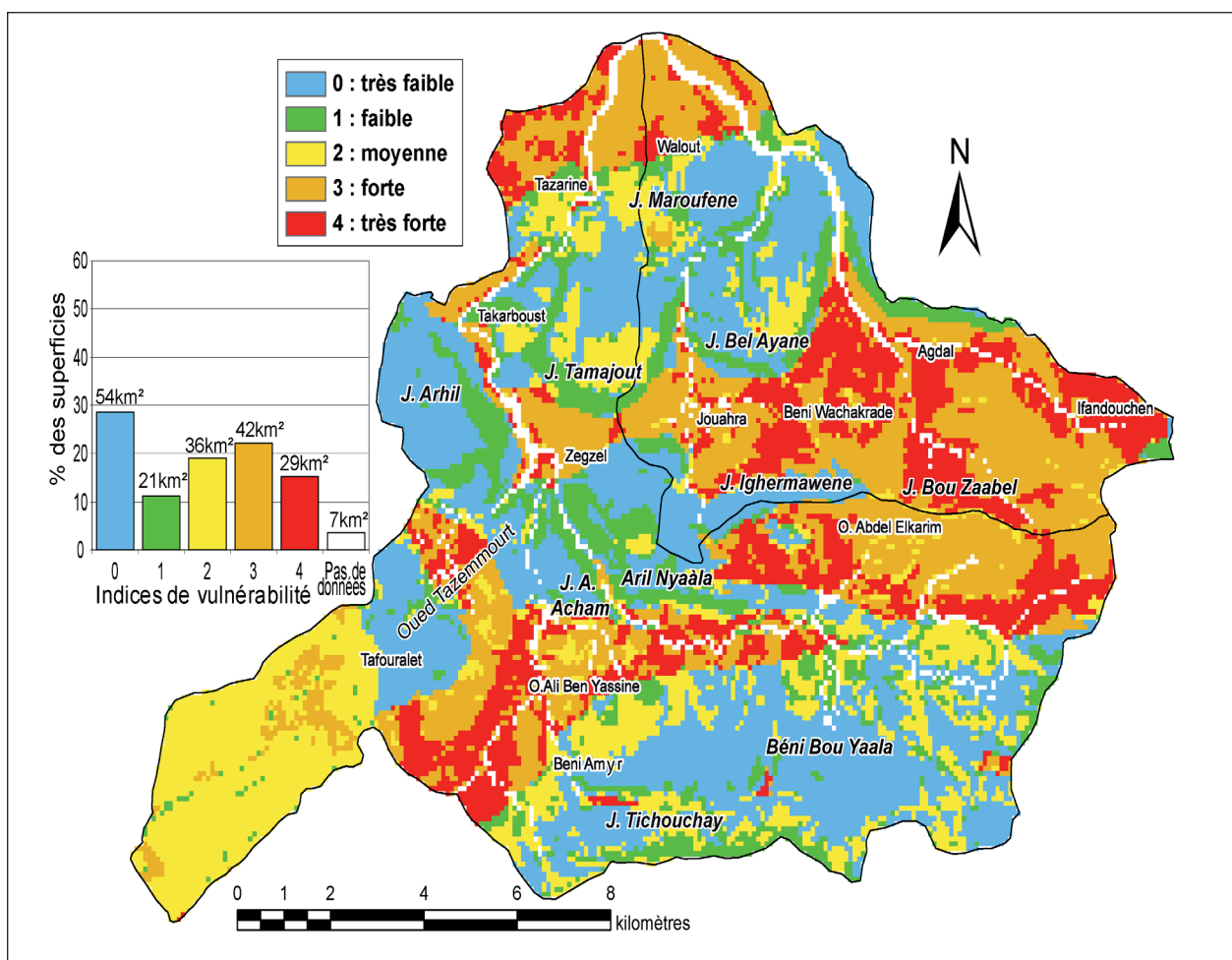


Figure 6.14 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1997.

Comparaison de trois périodes d'observation

L'évolution temporelle du critère « occupation du sol » influence la répartition spatio-temporelle du paramètre « Infiltration » lors des trois périodes d'observation (figure 6.15). Les terrains de forte vulnérabilité associés aux champs cultivés présentent 16 km² pour les périodes d'observation des années 1940 et 1970. Cette catégorie atteint 28 km² en 1997. Ceci est dû aux exploitations agricoles développées au piémont du massif. En revanche, le cas d'analyse met l'accent sur la

double action des pratiques anthropiques et sur l'évolution du degré de vulnérabilité :

- 1 - **dégradation du milieu** : l'explosion démographique et la surexploitation des ressources naturelles des années 1960/1970 ont produit une (i) augmentation des zones très fortement vulnérables (6 km² sur environ 24 ans), malgré les missions de reboisement des années 1950 ; (ii) une baisse de la superficie des aires de faible vulnérabilité ;
- 2 - **renforcement du milieu** : les campagnes de reboisement menées au début des années 1970, dans le cadre du Plan National de Reboisement (PNR) et la conscience des gestionnaires des ressources naturelles ont favorisé le renforcement de la protection du milieu (les aires de faible vulnérabilité sont passées de 70 km² en 1970 à 107 km² en 1997. Cette action a donné une réduction de superficie des zones de forte vulnérabilité de 49 km² en 27ans.

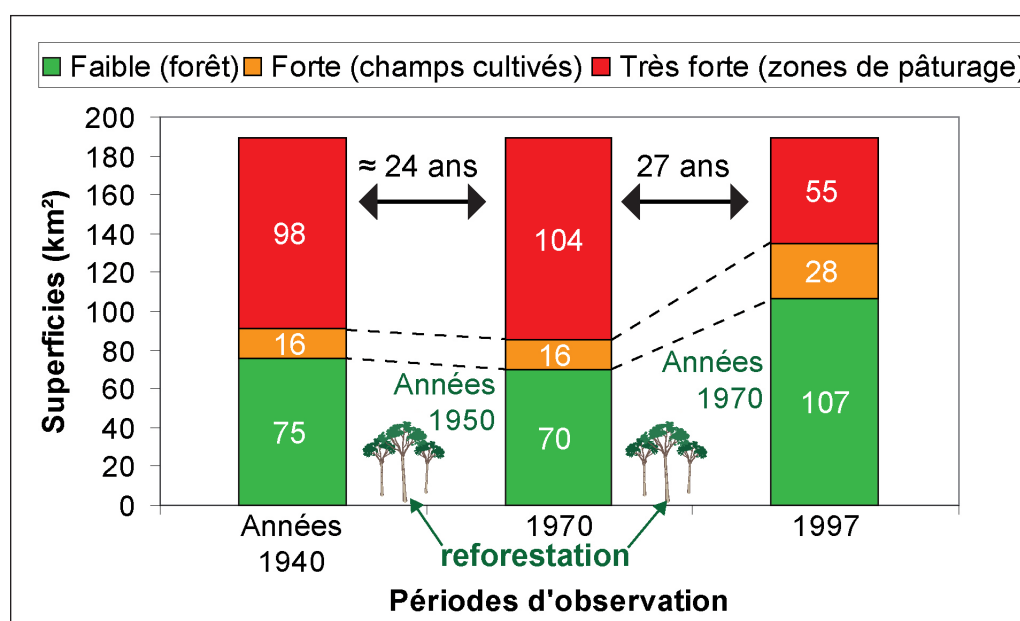


Figure 6.15 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du sous critère « occupation du sol » (années 1940, 1970 et 1997) dans le deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.

En ce qui concerne la comparaison de la répartition spatiale du paramètre « Infiltration », l'évolution temporelle de l'occupation du sol a fortement influencé l'extension spatiale du degré des classes de vulnérabilité (figure 6.16) :

- (i) - l'indice de très faible vulnérabilité : c'est en 1997 que la superficie de cette classe atteint la valeur la plus importante soit 54 km² par rapport à 23 km² pendant les années 1940 et 24 km² en 1970 ;
- (ii) - l'indice de faible vulnérabilité occupe des superficies importantes pendant les années 1940 (68 km²) et 1970 (67 km²) par rapport à seulement 21 km² en 1997. Il est important de souligner qu'une partie ces zones a été renforcé pour atteindre une vulnérabilité très faible ;
- (iii) - l'indice de moyenne vulnérabilité couvre une superficie importante en 1997 (36 km²). Pendant les années 1940 et 1970 cet indice présente 20 et 18 km² respectivement ;
- (iv) - Indice de forte vulnérabilité et l'indice de très forte vulnérabilité sont peu variables, ils sont associés aux zones non karstiques, aux terrains non boisés, et aux crêtes.

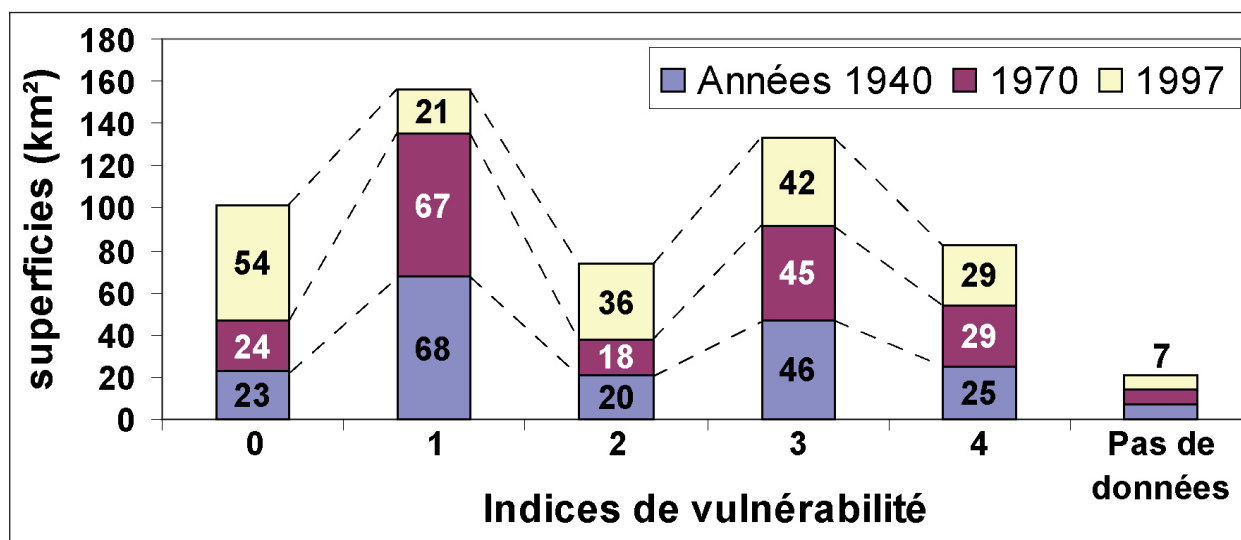


Figure 6.16 : Comparaison temporelle (années 1940, 1970 et 1997) de la répartition spatiale du paramètre « Infiltration ».

5. Cartes de vulnérabilité globale

Les cartes présentant la vulnérabilité globale des trois décennies de référence (1940, 1970 et 2000) (figure 6.18) permettent d'apprécier la variabilité de la vulnérabilité d'une période à une autre. La répartition spatiale de la vulnérabilité temporelle dépend de l'importance du « facteur de protection » des paramètres à caractère variable : précipitations, occupation du sol (couvert forestier et pratiques anthropiques) (figure 6.17).

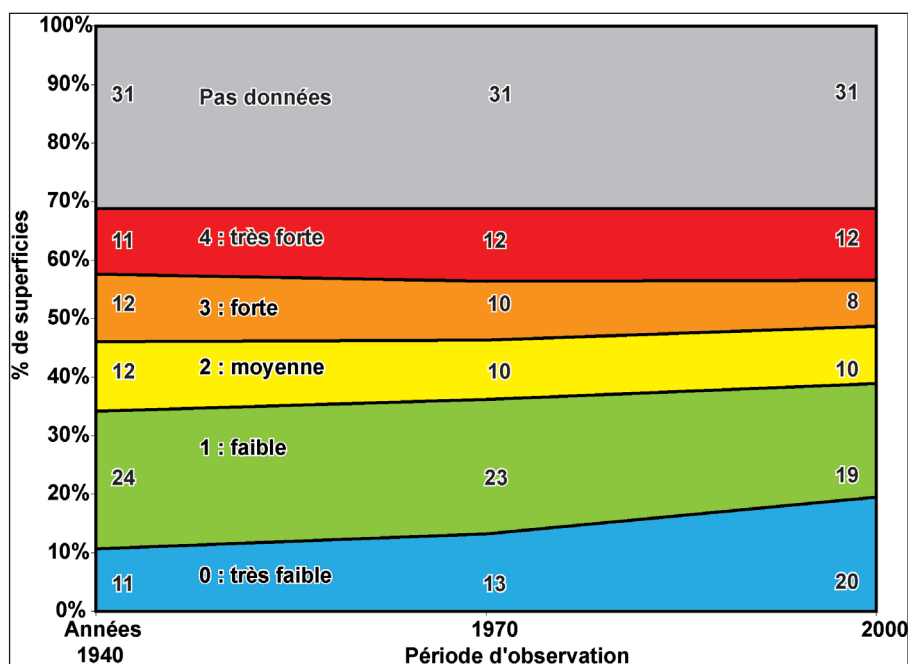
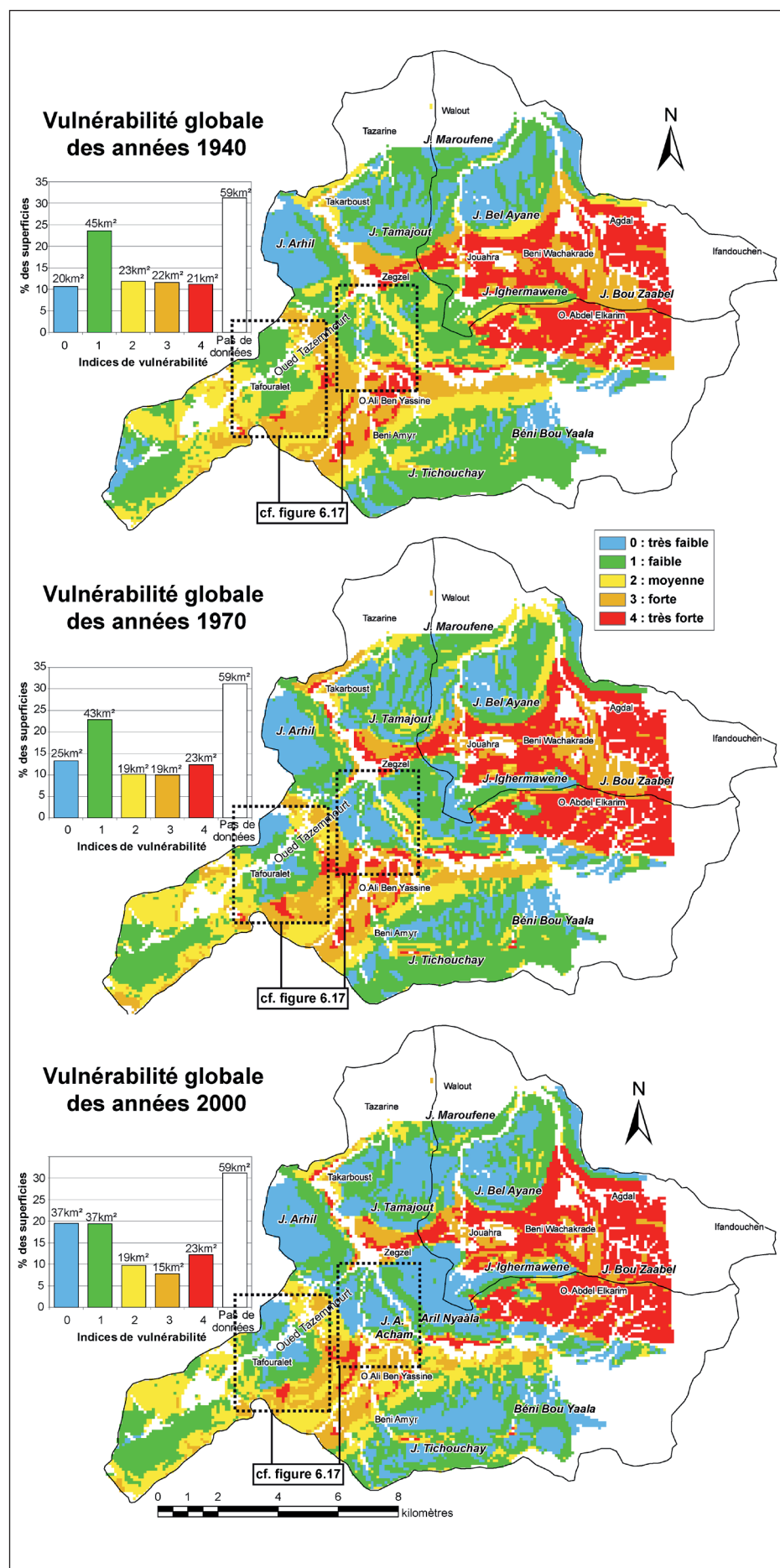


Figure 6.17 : Diagramme des superficies des indices de vulnérabilité pour les décennies 1940, 1970 et 2000 (exprimé en pourcentage des surfaces).

Figure 6.18 : Evolution temporelle de la vulnérabilité et modification des facteurs protecteurs des paramètres variables (précipitations et occupation du sol).



Pendant les années 1940, la superficie présentant une vulnérabilité très forte est de 11 % de la zone d'étude par rapport à 12 % pendant les années 1970 et les années 2000. A contrario, le pourcentage de vulnérabilité très faible est maximal dans cette même période (20%) c'est donc une période d'augmentation des contrastes de vulnérabilité. Cette sensibilité du milieu pendant la période 1970, est la conséquence de : (i) la mise en faillite définitive de l'équilibre traditionnel de la période coloniale et précoloniale, (ii) la mise en culture des terres marginales, les plus pentues et les plus sensibles à l'érosion (celles que la période coloniale a dénudé de leur couvert végétal) pour subvenir aux besoins d'une population en pleine explosion et (iii) le manque d'entretien des pratiques anti-érosives (terrasses agricoles) à cause de l'exode rural. Ces facteurs se sont manifestés sur le milieu par une dégradation importante des ressources naturelles : érosion intense sur les zones en friche, surexploitation des ressources forestières, etc. A titre d'exemple la zone forestière est passée de 75,4 km² pendant les années 1940 à 71,1 km² pendant les années 1970, malgré les campagnes de reboisement des années 1950 (ZOUHRI 1989). Il apparaît donc que les conditions socio-économiques et les contraintes politiques fragilisent la sensibilité du système. Pendant les années 2000, la superficie de la forêt atteint 113.8 km², et ceci après la mise en œuvre du Plan National de Reboisement (PNR) en 1972 (Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole et al 1995). Cette initiative a participé à la réduction de la superficie de la forte vulnérabilité : 8 % pendant les années 2000 par rapport à 10 % pendant les années 1970 et 12 % pendant les années 1940. La figure 5.26 montre que certaines zones sont passées de forte vulnérabilité et/ou de moyenne vulnérabilité pendant les années 1940 et 1970 à une faible vulnérabilité pendant les années 2000. Ceci explique que certaines décisions politiques (le reboisement dans ce cas d'étude) favorise la protection du système.

Pour mieux appréhender l'évolution temporelle de la vulnérabilité à l'échelle de l'analyse, un zoom sur les zones les plus anthropisées (Zegzel et Tafouralet) a été menée (figure 6.19). L'observation de ces cartes (présentant une maille de 90 m) permet d'apprécier la variation temporelle des aires de vulnérabilité pendant les trois périodes de comparaison (1940, 1970 et 2000). Pour les deux secteurs observés, on constate que les zones de très faible vulnérabilité (en bleu) sont plus importantes pendant les années 2000 qu'on cours des années 1970 et 1940. Les conditions socio-économiques et les décisions politiques ont pu renforcer le milieu. En contre partie, les années 1970, caractérisées par une forte fragilisation du milieu (dû à la surexploitation du milieu et à l'absence d'une bonne gestion des ressources naturelles, malgré les missions de reboisement des années 1950), présentent une extension importante des zones à très forte vulnérabilité (en rouge). Ceci montre que les pratiques anthropiques et la gouvernance de l'espace peuvent fragiliser le milieu.

Il convient cependant de rappeler que si les facteurs politiques socio-économiques et culturels sont des paramètres externes au système « vulnérabilité des eaux karstiques », ils influencent d'une manière indirecte la sensibilité de celui-ci.

La vulnérabilité dépend également de la fréquence et l'intensité de pluie. Bien que la variabilité du paramètre « P » indique que les années 1970 présentent une vulnérabilité beaucoup moins accentuée que pendant la période d'observation 2001/2004 (avec 169 km² de zones de faible vulnérabilité et seulement 21 km² de zones moyennement vulnérables (cf. figure 6.8)), la fragilisation du couvert forestier a engendré une amplification de la vulnérabilité pendant cette période.

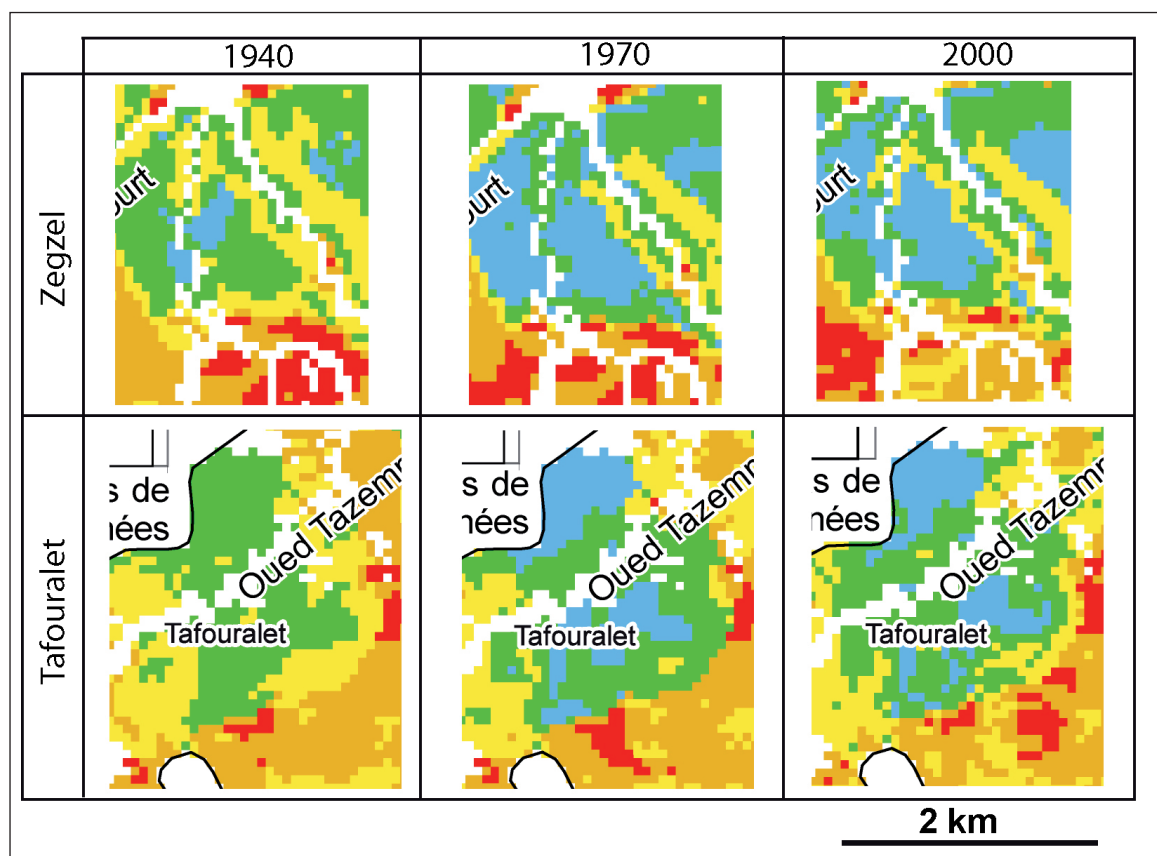


Figure 6.19 : Exemple de l'évolution temporelle de la vulnérabilité pour les deux zones les plus anthropisées (Tafouralet et Zegzel) pendant les années 1940, 1970 et 2000.

6. Evolution temporelle selon le paramètre précipitation (année 2000)

Pour mettre l'accent sur l'influence du paramètre « P » dans l'évolution temporelle de la vulnérabilité, une étude comparative est centrée sur les deux années les plus contrastées de la période d'observation 2001/2004 (tableau 6.3).

	Berkane		Ain Almou		Tafouralet		Slimania		Oujda		Al Youn	
	P	I	P	I	P	I	P	I	P	I	P	I
2001/2002	338	7.7	244	5.3	445	12.7	355	9.9	353	8.6	259	8.9
2002/2003	410	8.7	467	12.6	458	15.3	432	10.8	275	7.7	196	6.5
2003/2004	267	7.2	780	26.9	750	18.3	597	15.3	285	7.7	341	12.6

(P : précipitation en mm, I : Intensité pluviométrique)

Tableau 6.3 : Précipitations et intensité pluviométrique de la région nord est du Maroc (2001/2004).

Le choix des caractéristiques pluviométriques les plus contrastées se focalise, en premier lieu, sur la quantité des précipitations enregistrées dans les stations approximatives de la zone d'étude soit Tafouralet, Ain Almou et Berkane respectivement, ainsi que sur l'intensité pluviométrique :

- (i) - l'année la plus humide de la période de référence est l'année 2003/2004 bien que la station de Berkane enregistre une moyenne faible (267 mm/an) par rapport aux autres années d'observations. Cette période est caractérisée par une intensité pluviométrique très forte pour les stations de montagne : 26,9 pour Ain Almou et 18,3 pour la station de Tafouralet. Cette caractéristique participe à la fragilisation du milieu par l'accentuation de l'érosion hydrique surtout dans les sols dénudés et à forte pente. Ce facteur facilite la migration des matières en suspension (MES), via les points d'infiltration ponctuels, ce qui provoque une turbidité remarquable des eaux de sources pendant les averses violentes. Il est important de souligner qu'en mars 2004 la station d'Ain Almou a reçu 465 mm en 5 jours et la station de Tafouralet a enregistré 443 mm en 8 jours. Ceci implique un ruissellement torrentiel, un arrachement de la couverture pédologique exposée, une infiltration concentrée via les pertes ce qui engendre un transport rapide des (MES) et provoque, d'une part, une dégradation immédiate et chronique de la qualité des eaux et, d'autre part, accélère la fragilisation des ressources naturelles et notamment la couverture pédologique ;
- (ii) - l'année la plus sèche est l'année 2001/2002 dont les précipitations les plus élevées ne dépassent guère 450 mm/an (station de Tafouralet). Ceci peut avoir une influence négative sur la recharge karstique malgré la faible intensité pluviométrique. Pour la station la plus arrosée, durant cette période d'observation, on note seulement 35 jours de pluie avec une moyenne mensuelle de 3 jours. Ceci reflète l'aridité du milieu qui peut être interrompue par de brèves périodes humides.

Ce constat, permet de mettre l'accent sur l'impact des conditions climatiques de type méditerranéen semi-aride sur la vulnérabilité des ressources en eaux. La cartographie spatiale de l'évolution temporelle de la vulnérabilité engendrée uniquement par la variable précipitation rendra compte de cette irrégularité (figure 6.20).

L'observation de la figure 6.20 montre que l'indice de très forte vulnérabilité reste stable pour les deux périodes d'observation. Les quatre autres indices sont très variables et notamment les indices de très faible et faible vulnérabilité. Tous les plateaux calcaires sont touchés par cette variation : jbel Tichouchay, Béni Bou Yaala, Aril Nyaàla, jbel Bel Ayane, jbel Tamjout, jbel Arhil Tafouralet. La zone des O. Ali Ben Yassine présente une vulnérabilité forte à très forte. Ces valeurs de degré de vulnérabilité sont associées à la nature lithologique (marno-calcaire) et aux modes d'occupation du sol (déforestation).

L'homme peut atténuer la vulnérabilité de ce paramètre naturel par le renforcement de la couverture bio-pédologique qui influence par conséquent le mode, la nature et la durée de l'infiltration.

Conclusion

L'analyse proposée ici est basée sur le développement d'une méthode complémentaire aux méthodes déjà existantes pour l'étude de la vulnérabilité des systèmes karstiques. Elle met plus particulièrement l'accent sur les paramètres changeants du système et parmi ceux-ci, *les activités humaines* dans un massif de moyenne montagne soumis à des changements socio-économiques au cours du dernier siècle et *l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations* de type méditerranéen semi-aride. Cette étude diachronique met donc en évidence le rôle des facteurs variables sur le

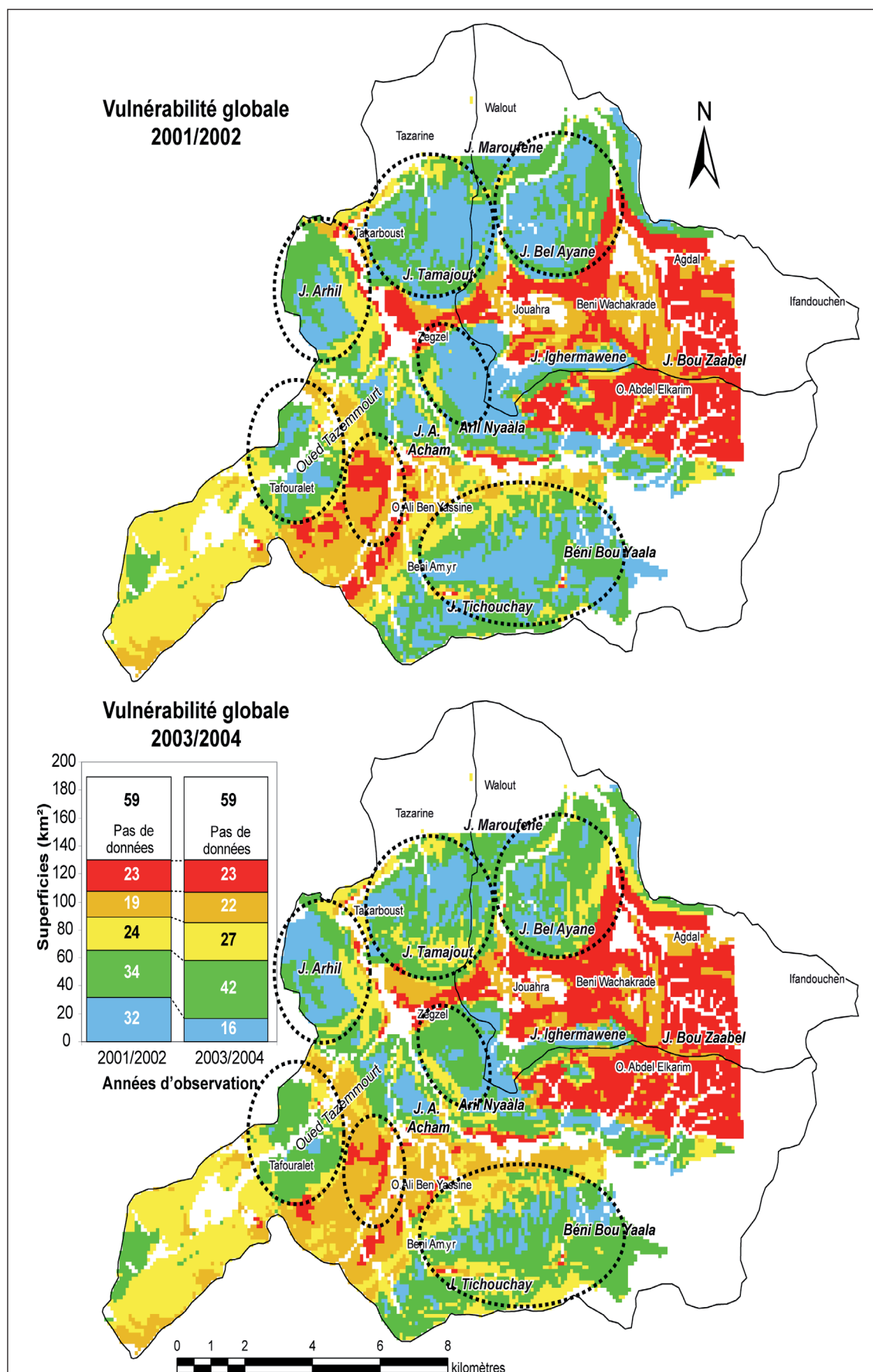


Figure 6.20 : Evolution temporelle de la vulnérabilité en fonction de l'irrégularité du paramètre « Précipitations » (2001/2002 et 2003/2004).

système via les activités anthropiques et notamment l'évolution du couvert végétal et l'occupation des sols. Ces activités favorisent soit la fragilisation du système par la dégradation et la surexploitation des ressources naturelles (défrichement, coupe de bois, incendies, activités agro-pastorales non adaptées etc.) soit au contraire favorisent sa protection par le renforcement du système (terrasses agricoles, reboisement, restauration etc.). L'évaluation du paramètre « précipitation » rend compte de l'impact naturel de la fragilité du milieu (sécheresse, averses violentes, etc.) sur l'évolution temporelle de la vulnérabilité. Les pratiques humaines, visant une gestion durable du milieu, peuvent régulariser l'amplification de ce facteur naturel.

L'utilisation de l'outil SIG dans cette analyse permet en outre : (i) de tester aisément les différentes classes attribuées aux différents paramètres et (ii) de produire un rendu de cartographie fine de l'évolution de la vulnérabilité. Pour les décideurs socio-économique, on montre ainsi (figure 5.26) que des zones précises (crêtes, interfluves, têtes de bassin-versant) sont plus particulièrement soumises à ces modifications. Cette identification géographique orientera les prochaines investigations de terrain, mais pourra aussi servir de support de réflexion et d'aide à la décision en matière de gestion de la ressource et des territoires. A ce titre, les Béni Snassen, massif karstique emblématique de moyenne montagne du Maroc constitue un référentiel de ce type d'évolution.

CONCLUSION PARTIE II

L'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques a été menée grâce à la mise en place d'une **approche interdisciplinaire**. Cette approche assemble les thématiques suivantes : géologie, géomorphologie, spéléologie, pédologie, climat, géographie, histoire, etc.

Après avoir présenté la spatialisation de chaque facteur intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques, l'interaction des différents facteurs a été mise en place. Cette interaction permet de proposer un support cartographique reflétant la réalité du terrain et lisible par tous les acteurs impliqués dans la « **problématique eau** ». La mise en place d'une méthode adaptée au questionnement de la ressource en eau en milieu méditerranéen semi-aride s'est avérée indispensable.

L'évaluation de la **vulnérabilité spatio-temporelle** des eaux karstiques a été menée ici à travers l'application d'une **méthode multicritères « PPILK »** et d'une **approche diachronique**. Ceci a permis de tirer les conclusions suivantes :

- la **construction d'un SIG** s'est avéré être un outil indispensable pour cette étude interdisciplinaire croisant des données de différentes origines. Le SIG facilite en effet l'assemblage des données d'origine variées, le stockage, la spatialisation, le traitement et le croisement de celles-ci. Le SIG permet également de tester aisément les différents facteurs de pondération et de produire ainsi plusieurs rendus spatialisés efficaces ;
- l'obtention des **cartes de vulnérabilité globale** est effectuée par la mise en place de plusieurs tests combinatoire. Les résultats proposés ont permis de mettre le doigt sur les paramètres qui contrôlent la **répartition spatiale** des aires de vulnérabilité. Ces paramètres sont essentiellement « l'Infiltration » et « la Lithologie ». Malgré la différence des facteurs de pondération d'une carte à l'autre, certaines zones s'individualisent dans toutes les cartes obtenues. Ceci est lié aux conditions environnementales et/ou anthropiques qui contrôlent le degré de vulnérabilité quelque soit le poids d'importance accordé aux paramètres ;
- **une analyse morphogénique endokarstique** a permis de proposer une première reconstitution paléogéographique de la grotte du Chameau. Cette démarche permet d'appréhender l'évolution temporelle de la grotte à l'échelle du Quaternaire et de comprendre la mise en place du réseau karstique ;
- enfin l'évaluation de la **vulnérabilité temporelle** à l'échelle d'un siècle, a mis en avant le rôle des deux facteurs variables : « occupation du sol » et « précipitations ». Cette approche révèle que les activités anthropiques peuvent fragiliser le milieu (dégradation des ressources naturelles), comme elles peuvent le renforcer (protection et gestion durable des ressources).

Les résultats obtenus constituent un véritable support pour l'aide à la décision et la bonne gestion des ressources naturelles. Ils permettent d'apprécier l'évolution temporelle du milieu, sa fragilité et sa sensibilité aux éléments « internes » du système « vulnérabilité des eaux » (précipitations, sols, végétations) et aux éléments « externes » (décisions politiques : reboisement, restauration, etc.).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce travail de recherche, il convient de dégager les éléments essentiels de l'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride à partir du cas des Béni Snassen (Maroc oriental). Cette vulnérabilité est essentiellement associée ici au contexte semi-aride et donc à la recharge de l'aquifère karstique (cf. introduction générale).

L'objectif de cette conclusion générale est donc de tenter de sortir de l'évidence et de la technicité de déterminations des « zonages » qui se présentent comme identification de l'évaluation, pour les considérer comme des actes de dénomination, de qualification et de valorisation qui instituent des territoires d'action. Cette démarche prolonge le travail de scientifique, qui n'est pas seulement de présenter un constat de la situation actuelle du milieu, mais d'appréhender les raisons de ce constat. Le scientifique doit également, s'interroger sur la valeur des limites des aires qu'il analyse : est ce que le décideur va se baser sur ce découpage lors de la mise en place des mesures de protection ? Quelles conclusions tirer de cette analyse au regard de la question de la spatialisation des zonages et des actions ?

Notre projet est de rendre applicable cette démarche sur tous les massifs karstiques et notamment ceux de la rive sud du bassin méditerranéen. Les résultats sont donc destinés aux acteurs décideurs de la problématique « eau » comme aux scientifiques. L'analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité permet de cibler les territoires sensibles présentant des enjeux pour la protection et la gestion des ressources en eaux karstiques.

1. Objectifs de la thèse

Au début de ce mémoire nous nous étions fixés comme objectifs d'évaluer les paramètres contrôlant la vulnérabilité des eaux dans le massif des Béni Snassen et de fournir aux décideurs locaux et régionaux une modélisation spatio-temporelle de cette vulnérabilité sur la base de l'utilisation de systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Cette approche devait utiliser deux entrées :

- (i) l'entrée karstique qui permet de combiner le contexte géologique, l'évolution géomorphologique et les données environnementales (bio-pédologique et climatique) ;
- (ii) l'entrée anthropique qui pose les usages passés et actuels et permet de prendre en compte les modes de réponse (en termes d'aménagement, de protection) pour préserver la qualité de la ressource en eau.

Après avoir défini la problématique « *pénurie en eau* », des méthodes de recherche adaptées ont été développées : méthode multicritères « PPILK » et approche diachronique. L'application de cette méthode et de cette approche devant permettre de mener une analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité.

2. Méthodes de travail

Cette étude concernant l'aménagement du territoire et l'aide à la décision des ressources en eaux karstiques a nécessité une organisation en six étapes (figure 8) :

- (i) **étape 1** : identification de la problématique en répondant à la question suivante : « Qu'est ce

que nous voulons protéger ? ». Dans la présente étude, l'objectif est de protéger les ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride ;

- (ii) **étape 2** : structuration des facteurs intervenant dans la problématique « vulnérabilité des ressources en eaux karstiques » et la mise en place d'une approche systémique. Cette étape est réalisée grâce une entrée interdisciplinaire qui permet d'appréhender les paramètres « environnementaux » (géologie, géomorphologie, climat, couverture bio-pédologique) et les paramètres anthropiques (actions socio-économiques) qui contrôlent la vulnérabilité des eaux karstiques. L'approche systémique permet d'apprécier les interactions de ces paramètres (cf. introduction générale) ;
- (iii) **étape 3** : présentation à l'aide des supports cartographiques de chaque « sous système ». La spatialisation de chacun des sous systèmes rend compte de la discontinuité de chaque couche d'information. L'assemblage de ces couches contrôle la répartition spatiale des cartes de vulnérabilité globale (cf. chapitre 3) ;
- (iv) **étape 4** : évaluation multicritères après mise au point et utilisation de la méthode « PPILK » : Précipitation, couverture Protectrice, Infiltration, Lithologie et Karstification (cf. chapitre 4) et l'approche diachronique (cf. chapitre 6) ;
- (v) **étape 5** : communication et échanges avec tout des acteurs impliqués dans la question « eau » ;
- (vi) **étape 6** : questionnement sur la pertinence et les suites à donner à l'étude afin de l'appliquer et d'assurer une gestion durable de la ressource.

Les étapes 5 et 6 sont présentes durant toute l'étude.

3. Résultats majeurs : une analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité

Les résultats obtenus à partir de l'analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité dans les Béni Snassen sont les suivants :

1. les méthodes existantes (EPIK, RISKE, etc. (DOERFLIGER *et al.*, 1996, 1998) ; (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2000)) pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques ne semblent pas adaptées pour le massif des Béni Snassen car les données sont parcellaires et le milieu naturel et les pratiques anthropiques sont différents par rapport au nord de la Méditerranée où ces méthodes ont été développées. Aussi, nous proposons une méthode plus spécifique aux régions sud Méditerranée dénommée la méthode « PPILK ». Celle-ci est assez proche de la méthode COP (VIAS *et al.*, 2006), tout en tolérant le caractère parfois très lacunaire des données ;
2. l'application des différents « facteurs de pondération » des paramètres « PPILK » permet de définir la localisation spatiale des classes de vulnérabilité ;
3. la spatialisation et l'évaluation des paramètres intervenant dans la vulnérabilité rendent compte de l'hétérogénéité spatiale du degré de vulnérabilité. Ainsi les zones très fortement vulnérables sont celles qui n'ont pas de couverture protectrice, les crêtes et les formations lithologiques imperméables. Les zones de très faible vulnérabilité sont représentées par les formations calcaires et dolomitiques très karstifiées et les bassins d'alimentation développés dans les terrains karstiques ;

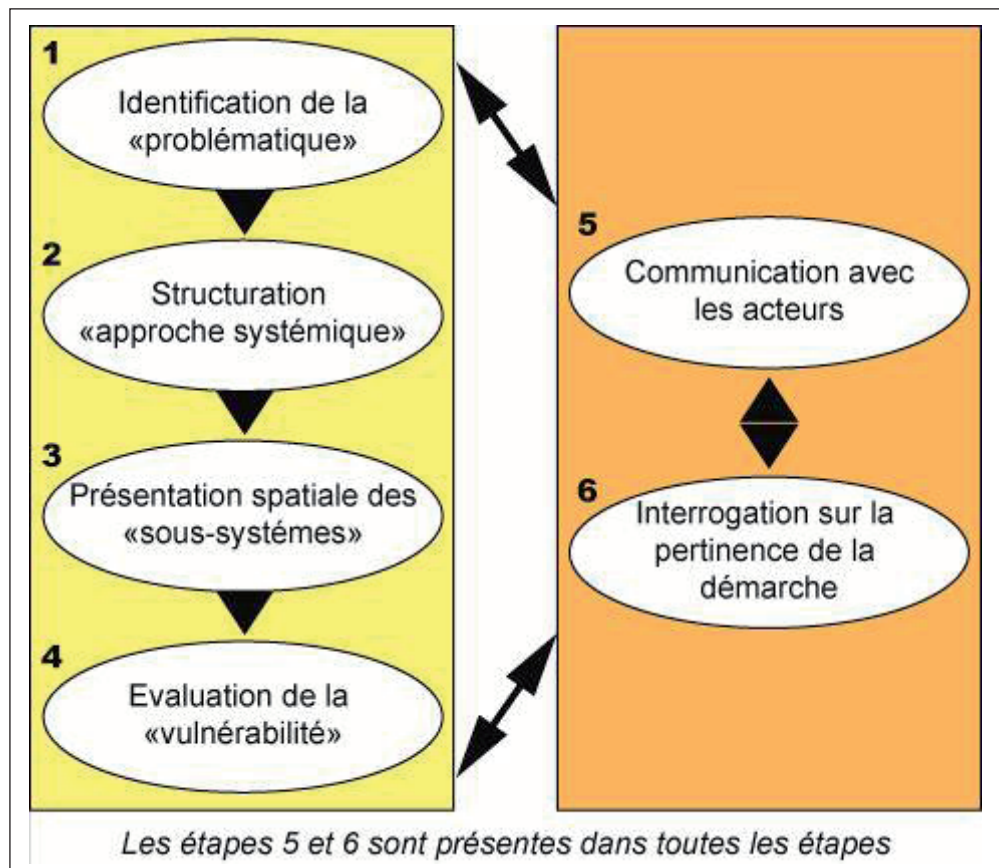


Figure 8 : Les six étapes de la mise en place d'une étude d'aide à la décision ici en contexte karstique semi-aride.

4. l'approche diachronique révèle le rôle des facteurs anthropiques dans l'évolution temporelle de la vulnérabilité du système. Les activités anthropiques passées et actuelles favorisent soit la fragilité du système par la dégradation et la surexploitation des ressources naturelles (défrichement, coupe de bois, incendies, activités agro-pastorales non adaptées, etc.) soit au contraire favorisent sa protection par son renforcement (terrasses agricoles, reboisement, restauration, etc.) ;
5. l'établissement des cartes synthétiques d'évaluation de la vulnérabilité constitue un support d'aide à la décision pour les acteurs locaux et régionaux en matière de gestion des ressources en eau ;
6. enfin le « SIG » constitue un outil méthodologique précieux, véritable support de ce type d'étude.

L'analyse utilisée a donc permis d'obtenir des supports cartographiques qui montrent une discontinuité de la répartition spatiale de la vulnérabilité et donc, comme GEORGE (1970) nous pouvons dire que « *la géographie se trouve confrontée à des problèmes de définition d'espaces homogènes et de limites, qui sont à la base de toute cartographie* ». Ces résultats sont le fruit d'interactions des paramètres contrôlant l'infiltration et la recharge des aquifères karstiques. Dans les cartes obtenues, les indices de vulnérabilité se divisent en cinq classes qui vont de très faible à très fort (cf. chapitre 3). Les discontinuités de la vulnérabilité sont considérées comme « dynamiques » car elles subissent une évolution dans le temps (cf. chapitre 6).

Cette recherche montre également que la carte est un outil indispensable dans cette analyse. Elle est présente à toutes les étapes du processus au moment : (i) de la « structuration du système » (répartition spatiale des sous systèmes) ; (ii) de l'« évaluation du système » (interaction des sous systèmes) ; (iii) mais aussi comme support de « territorialisation ». Les discontinuités influent donc sur la répartition des actions mais aussi sur les dynamiques de l'espace géographique « *la compréhension de la genèse des discontinuités, ainsi que la façon dont elles se combinent est la clé de la scientificité de la géographie* » (HUBERT, 1993).

La présence des seuils (dans les couches d'informations [PPILK]) justifie la discontinuité dans l'espace (cf. chapitre 3, 4 et 6). Dans ce découpage, la discontinuité dépend d'un gradient de la classification de vulnérabilité en se basant sur une division équidistante des pixels obtenus. Les seuils appliqués aux éléments spatialisés influence la répartition des discontinuités. Dans cette étude, la discontinuité se présente sous forme d'une « discontinuité zonale » (cf. chapitre 3, 4 et 6). Les aires de vulnérabilité sont finalement représentées sous la forme des zones affectées d'une couleur qui correspond aux degrés de vulnérabilité. Le zonage produit donc un effet de discontinuités spatiales affectant des caractéristiques, des usages et des actions à l'espace. Ce zonage n'est pas seulement la définition d'un périmètre, il inscrit la zone évaluée dans une typologie d'espace et dans un système de catégories. Ainsi chaque groupe de zonage présente une façon de penser à une action adaptée. Charge aux acteurs territoriaux de se saisir ensuite de ce zonage pour engager les actions les plus adaptées aux besoins du territoire investigué.

La démarche utilisée prend en compte un espace contenant des objets, des rapports, des discontinuités et des formes qui créent l'hétérogénéité spatiale. Cette démarche consiste à apprécier un second ordre de l'espace. Il s'agit donc « *d'identifier les systèmes qui organisent la dynamique des interactions entre les parties de substrat de l'objet géographique* » (HARVEY, 1969). Chaque sous système défini se caractérise par l'existence de limites, à l'intérieur desquelles se retrouvent des éléments partageant entre eux des rapports et des interactions. Dans le résultat final de l'analyse spatio-temporelle de la vulnérabilité, on distingue « *des discontinuités endogènes* » produites par la dynamique et les interactions des éléments internes et « *des discontinuités exogènes* », résultant des éléments extérieurs au système (décisions politiques comme le reboisement, la construction des aménagements anti-érosifs, etc.).

Les supports livrés à travers cette étude peuvent donc être utilisés par les différents acteurs dans la gouvernance¹ et la territorialisation² de l'espace. L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères karstiques a donc permis ici de définir les zones sensibles aux infiltrations et par incidence définir des périmètres de protection et d'action pertinents pour assurer une gestion durable de ces ressources. Cette démarche *d'évaluation*, basée sur une connaissance scientifique fine et variée, est donc indispensable avant toute décision concernant la protection des ressources en eau en milieu karstique. Pour appréhender la vulnérabilité d'un système karstique, une bonne connaissance des paramètres (voir chapitres 1 et 2) contrôlant le système « infiltration » et « recharge karstique » est donc bien nécessaire.

Après avoir offert une réflexion sur les outils d'évaluation et leurs efficacités dans la répartition spatio-temporelle de la vulnérabilité, l'important est finalement ici de considérer les aires de vulnérabilité (zonage) comme support d'aide à la décision pour les acteurs. Le cœur de notre

1. Ensemble des processus et des institutions qui participent de la gestion politique d'une société d'un territoire (LEVY et al., 2003)

2. La territorialisation apparaît comme une solution généralisée pour l'adaptation de l'action publique aux nouveaux enjeux.

approche fut donc de mettre l'accent sur les contextes d'action produits par les décideurs en s'appuyant sur le travail d'un expert scientifique.

4. Gouvernance, territorialisation de l'espace et place du scientifique

La confrontation entre les travaux des experts scientifiques et les décisions des acteurs est une étape majeure dans la bonne gestion du milieu (figure 9). Dans cette partie nous nous interrogeons sur la spatialisation des périmètres de protection définie par « les experts scientifiques » et sa portée pour déterminer les périmètres d'action mis en place par « les acteurs ». Autrement dit, à quel point les ensembles spatiaux construits par des scientifiques peuvent être considérés comme des territoires d'action ?

Comme nous l'avons montré dans les paragraphes précédents, les périmètres définis par les scientifiques sont des découpages issus des processus d'identification, d'évaluation, de définition des qualités et des valeurs d'ensemble spatiaux. Chacun de ces espaces sont définis sur la base de critère naturels ou anthropiques et tous exige une intervention particulière. La difficulté de la compréhension de la transparence des critères de la délimitation pour le décideur peut influencer les périmètres d'intervention. D'autres facteurs jouent un rôle sur la gouvernance et la territorialisation ; il s'agit de l'échelle d'observation et la proximité.

4.1. Echelles d'observation selon les acteurs et les actions : du local au global

La lecture et l'identification des discontinuités géographiques (ici la variation du degré de vulnérabilité) se révèlent très sensibles aux effets d'échelle. On sait que tout changement d'échelle modifie les perceptions et les représentations des espaces géographiques et parfois la nature même des phénomènes qui l'affectent. Un lieu peut se trouver impliqué dans plusieurs logiques de rupture ou au contraire de continuité, selon l'échelle de sa prise en compte (CARROUE *et al.*, 2002). La figure 9 présente les différents acteurs impliqués dans la gestion des ressources naturelles du massif des Béni Snassen. Ces acteurs ont des échelles de décision différentes qui vont du global au local. Ceci s'exprime sur le terrain par la complexité des jeux d'acteurs : l'action « in situ » va être plus ou moins forte selon la taille de l'espace sur lequel l'acteur travaille (échelle régionale/échelle locale).

Échelle régionale

A l'échelle régionale nous identifions les acteurs suivants : la préfecture de Berkane, l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM), le Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD), l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de la Moulouya (ORMVAM). Ces quatre acteurs ont pour but d'assurer une gestion durable des ressources naturelles (ressources en eau, ressources forestières, sol, ressources agricoles, etc.). Les acteurs sont essentiellement des fonctionnaires de spécialités variées (géologues, hydrogéologues, pédologues, géographes, économistes, biologistes, chimistes, etc.). En ce qui concerne l'acteur locaux, ils sont représentés par les élus au sein de la « préfecture de Berkane ». L'échelle d'observation de ces décideurs régionaux est différente. Le HCEFLCD et l'ABHM interviennent respectivement sur l'ensemble de la région orientale et le bassin versant de la Moulouya. Les deux bassins versants évalués présente une petite superficie de l'ensemble de leurs zones d'action. L'ORMVAM intervient seulement en aval de la zone d'étude (les petites et moyennes hydrauliques

de Zegzel et Béni Wachakrade). En ce qui concerne la préfecture de Berkane, la zone n'est pas prioritaire car elle représente les zones montagneuses marginalisées en comparaison avec la plaine des Triffa et la côte méditerranéenne qui présentent un intérêt économique important aux yeux des décideurs et qui méritent plus de valorisation et d'investissement.

Échelle locale

A l'échelle locale on peut distinguer deux grands ensembles d'acteurs : les communes (figure 9) et la population locale.

Communes

L'observation de la figure 9 montre que six communes sont impliquées dans la gestion de la zone d'étude. Ces communes sont Sidi Slimane, Zegzel, Fouzouane, Tafouralet, Rislane et Chouhiya. Les superficies d'intervention de ces communes sont variables (tableau 1). Par exemple 61 % de la superficie totale de la commune de Tafouralet se trouve compris dans la zone d'étude. Cette commune représente 45 % de la zone d'étude. Une superficie importante de la commune de Zegzel couvre le terrain étudié soit 44 %. La commune de Zegzel présente 28% de la superficie étudiée. En revanche, pour la commune de Sidi Slimane 34 % de la commune se trouve dans la zone investie, cette zone présente seulement 1,5 % de la superficie totale de la zone d'étude. Les décisions politiques et socio-économiques prises par les communes de Tafouralet, Zegzel et Fouzouane qui couvrent des superficies importantes du terrain d'intervention (86, 54 et 38 km² respectivement) sont donc décisives dans la gestion du milieu. Cette situation de pluri-communalité entraîne donc des inégalités au niveau des actions dans les deux bassins versants et des communes sont plus investies que d'autres. L'intercommunalité peut poser des problèmes de la mise en place d'un projet commun de gestion du milieu et de trouver un consensus commun.

	%Superficie de la commune dans les bassins versants	%Superficie de la zone d'étude par commune
Sidi Slimane	34	1.5
Zegzel	44	28
Fouzouane	21	20
Tafouralet	61	45
Rislane	2	5
Chouhiya	0.1	0.1

Tableau 1 : Superficie d'intervention par rapport à la superficie totale de la commune et par rapport à la zone d'étude (exprimé en pourcentage des surfaces).

Population locale

L'intégration de la population locale dans l'aménagement du territoire et la prise de décision ne sont pas toujours faciles à prendre en compte. La majorité des décisions sont prises sans aucune communication avec les acteurs locaux (selon des entretiens avec la population locale). Cette politique donne le sentiment que les décisions sont imposées sans concertation et que la population locale est exclue et mise à l'écart des processus de prise de décisions.

Deux positions différentes de la population locale sont constatées : (i) *la population située en*

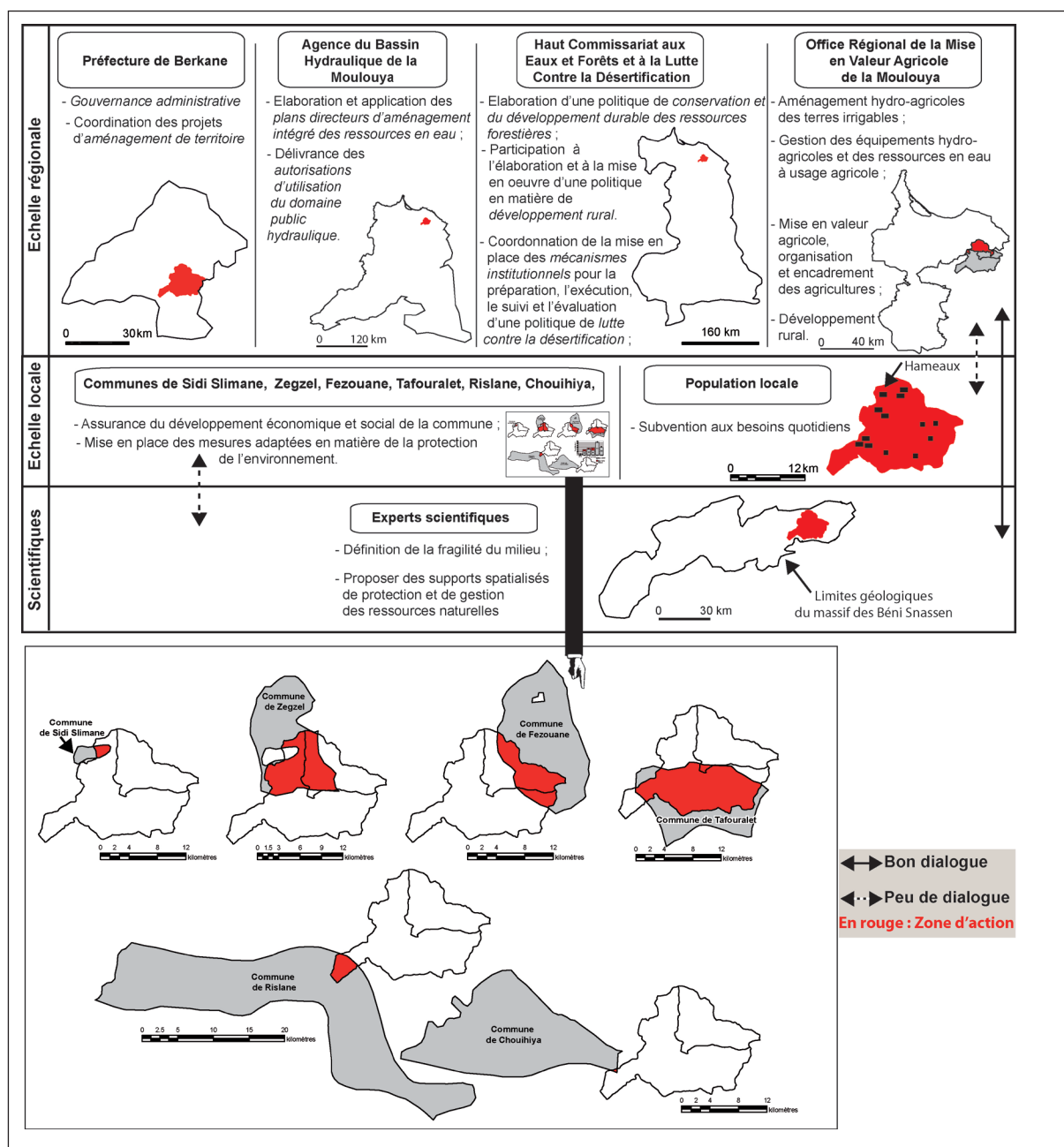


Figure 9 : Les acteurs impliqués dans la gouvernance et la territorialisation du massif des Béni Snassen. Différentes échelles de décision (du régional au local). En haut, en rouge apparaît les deux bassins versants étudiés et en bas la zone d'action de chaque territoire de décision.

aval qui ne se sent pas concernée par la problématique « pénurie en eau ». L'abondance relative des ressources en eaux pérennes, l'encadrement des agriculteurs et les aménagements hydro-agricoles par l'ORMVAM justifie cette position ; (ii) la population située en amont est plus exposée aux problèmes « rareté des ressources en eaux » et manque d'un encadrement efficace pour faire face à cette problématique. Un autre facteur majeur dans le déséquilibre de la conscience de la population par rapport à leurs actes passés et actuels est « la compréhension de la relation amont/aval, surface/souterrain » dans la gestion des ressources naturelles et notamment les eaux karstiques.

Les différentes échelles d'observation et d'actions selon les institutions et les acteurs impliqués dans l'organisation de l'espace font ressortir des formes de « ségrégation spatiale » qui sont visibles sur les cartes par rapport à la thématique. Selon l'angle d'observation de chacun de ces acteurs,

les discontinuités définies par les scientifiques se détectent, s'estompent, voire changent de sens, en fonction de l'échelle d'observation retenue (CARROUE *et al.*, 2002). Par exemple pour la commune de Tafouralet (61 % de sa superficie couvrent le terrain évalué) l'angle d'observation et la prise en considération des résultats fournis par les scientifiques ne sont pas les mêmes que le Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) qui intervient sur l'ensemble de la région orientale. L'échelle de discontinuités sera plus fine pour la commune de Tafouralet que pour le Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD).

Experts scientifiques

Le travail des experts scientifiques s'inscrit dans un processus qui consiste à évaluer un espace dit « vulnérable » pour tenter d'agir sur lui. Les actions et les mesures de protections nécessitent une étude fine des causes et des conséquences de la situation actuelle. Les recherches scientifiques livrent des supports cartographiques qui ont la capacité d'appréhender la réalité et parfois de construire un consensus autour d'un projet d'aménagement à travers une bonne communication avec les acteurs impliqués. Généralement dans les questions d'aménagement du territoire et la prise des décisions, il existe un bon dialogue entre les scientifiques et les institutions, en revanche il y a souvent peu de dialogue entre la population locale et/ou les institutions et les scientifiques.

La figure 9 permet de faire ressortir deux paramètres principaux : (i) la diversité des différentes relations ressources naturelles/territoire (selon les acteurs) et (ii) la présence d'une « gestion emboîtée » de l'espace :

- les institutions (services d'Etat) qui agissent à une échelle régionale ;
- les communes et la population locale qui agissent à une échelle locale ;
- les experts scientifiques qui développent des réflexions reflétant la réalité et proposent une gestion optimale de l'espace.

Des politiques de gestion peuvent être inspirées du système français : SAGE (Schéma d'aménagement et de Gestion des Eaux), et CLE (Commission Locale de l'Eau) pour assurer l'implication de tous les acteurs dans la gestion des ressources en eau, mais il convient cependant de tenir compte des particularités locales.

4.2. Proximité

Dans le terme proximité deux aspects sont analysés : proximité et accessibilité géographique et seuils appliqués dans la classification de la vulnérabilité.

(i) Accessibilité géographique

En zone montagneuse, l'accessibilité et la proximité géographique jouent un rôle important dans la prise de décisions et l'aménagement du territoire. Les zones situées en aval sont plus accessibles et donc plus concernées par les politiques d'aménagement que les zones éloignées et marginalisées. Ceci produit des formes de « ségrégation spatiale ». En effet, la figure 9 illustre des exemples de « ségrégation spatiale ». Celle-ci est liée au poids de l'héritage historique dans le découpage communal et administratif marocain. A titre d'exemple, les zones d'action des communes de Sidi Slimane, Zegzel et Fezouane bénéficient d'une gestion hydro-agricole assurée

par l'ORMVAM. Par contre les zones d'action des communes de Tafouralet, Rislane et Chouahiya se trouve hors de zone d'action de l'ORMVAM. Ceci engendre une « ségrégation spatiale » dans la mise en valeur agricole, l'organisation et l'encadrement des agriculteurs.

(ii) Seuils de classification de la vulnérabilité

Comme nous l'avons montré précédemment (chapitres 3, 4 et 6), le zonage implique un découpage de l'espace associé à la cartographie de la discontinuité spatiale. La détermination de chaque ensemble spatial est liée aux seuils définis ici dans le cadre de cette recherche. De façon générale, pour définir les discontinuités spatiales et/ou territoriales, les acteurs se basent essentiellement sur les seuils extrêmes de la classification (très faible vulnérabilité, très forte vulnérabilité) livré par le scientifique, d'où l'intérêt de proposer des supports cartographique à plusieurs échelles d'observation (selon le poids de pondération) et une synthèse des zones présentant les seuils extrêmes de toutes les cartes proposées (cf. chapitre 4, figure 4.8). Cette analyse permettra aux décideurs de se focaliser sur les zones les plus fragiles qui nécessitent une intervention immédiate.

4.3. Délimitation des périmètres de protection

La délimitation des périmètres de protection repose sur l'implication des acteurs dans la mise en œuvre de nouvelles stratégies de « gouvernance » et de « territorialisation ». La prise de décision engage des processus de négociation, d'arbitrage et de reconnaissance des divers enjeux de nature environnementale, politique, socio-économique, etc. à des échelles variables (du locale au globale). Chacun des acteurs favorise une vision du problème actuel et à venir selon ses propres valeurs (O' CONNOR, 2006).

Les ensembles spatiaux construits par les scientifiques peuvent finalement être considérés comme des territoires d'action. Le décideur essaie de prendre des actes de délimitation des périmètres d'actions. Les relations entre les acteurs doivent se baser sur la communication via des réunions régulières. L'organisation des débats et les échanges d'informations permet en outre le transfert des connaissances, l'identification des zones sensibles, la prise des décisions et l'organisation des actions sur le terrain. Ceci développe à terme une forte confiance au sein des acteurs et un engagement générale de la protection des ressources naturelles. Cette démarche permet notamment le développement des points suivants :

- création des liens entre les organisations ;
- circulation des informations ;
- apprentissage collectif ;
- création des compétences locales.

La mise en place d'une politique d'intégration de tous les acteurs impliqués dans la question « pénurie en eau et protection des ressources naturelles », permet de réduire la faille entre les résultats livrés par les experts scientifiques et les décideurs. Ces derniers doivent considérer des politiques de prévention et de protection adaptées au milieu. La concertation entre les différents acteurs « experts scientifiques », « institutions » et « locaux » est donc une clé pour une

gestion durable de la ressource.

5. Perspectives scientifiques

Le présent travail de recherche portait sur l'évaluation et la gestion des ressources en eaux karstiques. Il ouvre aujourd'hui plusieurs perspectives de recherches. Malgré des données parfois parcellaires, le développement de nouvelles méthodes « interdisciplinaires » (PPILK et approche diachroniques) offrent de multiples pistes de travail à la fois sur l'aspect « scientifique » et l'aspect « application ».

1. Aspect « scientifique »

On peut distinguer ici trois points :

- (i) **terrains et acquisition de données** : dès le début l'étude nous avons été confronté au manque de certaines données. Ces données absentes et/ou lacunaires ont constitué un réel handicap pour l'approfondissement de notre réflexion dans certains aspects : absence des informations sur les relations surface/souterrain, manque de suivi des débits de sources, absence d'un suivi hydrochimique des eaux souterraines, données pluviométriques lacunaires, etc. Ceci a influencé la compréhension de l'organisation et du fonctionnement du karst souterrain. L'acquisition de ces données permettrait de compléter efficacement les résultats obtenus ;
- (ii) **méthodes** : les méthodes existantes de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux karstiques ne sont pas toujours adaptées au milieu étudié. Le développement de nouvelles méthodes s'est avéré ici judicieux. Ces méthodes ont permis d'obtenir des résultats pertinents. L'intégration des données manquantes (précipitations, couverture pédologique et karstification souterraines) et des paramètres qui n'ont pas été pris en compte dans le processus d'évaluation (épikarst, densité de cheptel) peut donner des résultats plus performants ;
- (iii) **SIG** : l'approfondissement de la création de la base de donnée « SIG » et l'amélioration des méthodes de croisement, superposition et pondération des couches d'information favoriseraient la production des supports cartographiques d'aide à la décision à une échelle plus fine donc plus pertinente.

2. Aspect « application »

L'application des actions et des mesures de protections est une étape importante dans la gestion des ressources en eau. Dans le futur, il serait très intéressant de présenter d'une manière plus poussée les différentes formes de concertations qui constituent les bases des actions de préservation, de gestion et de protection des ressources en eaux. Cette démarche peut être considérée comme concept de « concertation sociale » qui combine des aspects environnementaux, territoriaux, économiques et sociaux.

Les Béni Snassen, moyenne montagne du Maroc oriental, massif emblématique de ces problématiques et de ces enjeux sociétaux, méritaient bien qu'un travail de thèse leur soit consacré. Gageons qu'il ne s'agisse là que d'un début et que de nombreuses études et recherches viendront compléter l'analyse proposée ici.

BIBLIOGRAPHIE

A

- AL KARKOURI J., LAOUINA A., ROOSE E., SABIR M. - 2000** - Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah-Rif central (Maroc). *Bull. Réseau érosion* Vol 20, pp. 342-356.
- AL MAJOU H., BRUAND A., DUVAL O., COUSIN I. - 2007** - Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *AFES, Etudes et gestion des sols*, Vol 14. n°2, pp. 103-115.
- AL MAJOU H., BRUAND A., DUVAL O., COUSIN I. - 2007** - Variation of the water-retention properties of soils : validity of class-pedotransfer functions. *Geoscience*, Vol 339. pp. 632-639.
- ARNOULD P., HOTYAT M. - 2003** - *Eau et environnement. Tunisie et milieux méditerranéens*, éd. ENS, Lyon, 208 p.
- AUBERT G. - 1986** - Réflexions sur l'utilisation de certains types de banquettes de « Défense et Restauration des Sols en Algérie ». *Cahier ORSTOM, série Pédologie* Vol. XXII. n° 2, pp. 147-151.

B

- BAKALOWICZ M. - 1979** - *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse de doctorat d'état es sciences. Univ., P., et M., Curie. Paris VI, 270 p.
- BARATHON J-J., EL ABBASSI H., LECHEVALIER C. - 2010** - Gestion des sols et de l'eau dans le massif d'Ifni Anti-Atlas occidental, Maroc, *Norois*, Vol. 214, pp. 101-111.
- BENCHETRIT M. - 1972** - L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Publications université Poitiers, *P.U.F.*, Paris, 216 p.
- BETHEMONT J. - 2001** - L'eau, le pouvoir, la violence dans le monde méditerranéen. *Hérodote*, Vol.103. pp. 175-200.
- BLAVOUX B., MUDRY J. - 1983** - Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie, géologie de l'ingénieur*. Vol 4 (1983), pp. 269-278.
- BORDI I., FRIGIO S., PARENTI P., SPERANZA A., SUTERA A. - 2001** - The analysis of the Standardized Precipitation Index in the Mediterranean area: large-scale patterns. *Annali Di Geofisica*. Vol 44. pp. 965-978.
- BOUABDELLAH M., BOUDCHICHE L., OUAHHABI B., NACIRI, T. - 2008** - Origine du soufre associé aux minéralisations Pb-Zn de type Mississippi valley de la chaîne des Ben Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). *C.R. Géosciences* Volume 340, Issue 12, pp. 822-828.
- BOUDCHICHE L. - 1986** - *Etude micropaléontologique du Domérien, Toarcien et Bajocien du Massif des Beni Snassen orientaux (Maroc nord Oriental)*. Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université de Lyon 1, 287 p.
- BOUDY P. - 1952** - Guide du forestier en Afrique du Nord. *La Maison Rustique*, Paris, 505 p.
- BOULHOL P. - 1952** - législation forestière marocaine. *Revue forestière française* Vol. 4. pp. 232-245.
- BOUMEAZA T. - 1985** - *Le massif des Béni Snassen orientaux (Maroc oriental) approche morpho-pédologique d'une moyenne montagne méditerranéenne*. Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université de Toulouse le Mirail, Institut de géographie Daniel Faucher, 219 p.

C

- CALVET R. - 2003a** - *Le Sol : Propriétés et fonction Tome 1, Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*, France Agricole, 455 p.
- CALVET R. - 2003b** - *Le Sol : Propriétés et fonction Tome 2, Phénomènes physiques et chimiques*, Editions France Agricole, 511 p.

- CAMUS J., LAMOUROUX C. - 1981** - Inventaire spéléologique du Maroc. *Direction de l'hydraulique, Ministère de l'équipement*. Rabat, 233 p.
- CARLIER P. - 1971** - *Ressources en eau du Maroc, domaine du Rif et du Maroc oriental*. Service Géologique du Maroc, Tome 1.
- CARROUE L., CLAVAL P., DI MEO G., MIOSSEC A., RENARD J.-P., SIMON L., VEYRET Y., VIGNEAU J.-P. - 2002** - *Limites et discontinuités en Géographie*. éd. SEDES, Dossiers des Images Economiques du Monde. p 159.
- CASTANY G., MARGAT J., - 1977** - *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.
- CHAÏEB M. - 1994** - Géologie structurale du socle du massif des Béni Snassen (Maroc oriental). *Mémoire présenté pour l'accès au grade d'ingénieur en chef. DG*. Rabat.
- CHALLOT J.-P. - 1952** - La restauration et l'amélioration des pâturages semi-arides du Maroc. *Revue forestière française*, Vol. 4, pp. 280-287.
- CHARVET J.-P. - 1970** - *La plaine des Triffa (Maroc oriental) : présentation géographique d'une région en voie de développement*. Thèse université Paris X.
- CHATTOU Z. - 1998** - *Migrations marocaines en Europe: le paradoxe des itinéraires*. éd. L'Harmattan, coll. Histoire et perspectives méditerranéennes. Paris, 254 p.
- CHOPPY J. - 2008** - Pourquoi se creusent les grottes ?, *Karstologia-Mémoires* n°16, 200 p.
- CIVITA M. - 1994** - Le carte della vulnerabilit  degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica [Contamination vulnerability mapping of the aquifer: theory and practice]. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*, Pitagora Editrice.
- CIVITA M., DE MAIO M. - 2004** - Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofisica Int* 43(4), pp 513-532.
- CIVITA M., DE REGIBUS C. - 1995** - Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilit  degli acquiferi (in Italian). *Quad Geol Appl Pitagora*, éd. Bologna 3, pp 63-71.
- COLLET C. - 1992** - Systèmes d'Information Géographique en mode image. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, Lausanne, 183 p.
- COLOMBANI J., LAMAGAT J.-P., THI BAUX J.-P. - 1972** - Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, Vol. IX (3), pp. 15-46.
- CUCCHI F., FRANCESCHINI G., ZINI L., AURIGHI M. - 2007** - Intrinsic vulnerability assessment of Sette Comuni Plateau aquifer (Veneto Region, Italy). *Journal of Environmental Management* Vol. 8, n 4, pp. 984-994.

D

- DAHMANI M. - 1998** - *Recherches biogéographiques en la rive droite de la basse Moulouya, (Maroc du Nord-Est), végétation-bioclimat et anthropisation*. Thèse d'Etat de l'Université de Mohammed Ier. Fac. Lett. et Sc. hum. Oujda, 473 p.
- DAKKI M., FEKHAOU B., EL FELLAH B., EL HOUADI., BELGUENANI H., DAKKI N. - 2003** - . Diagnostic pour l'aménagement des zones humides du nord-est du Maroc : 4. Oued Zegzel (Béni Snassene). *Royaume du Maroc M.A.T.E.E., Secrétariat d'Etat à l'Environnement & Département E.F.L.C.D*, 33 p.
- DE CHARRETTE H. - 2004** - *Les enjeux méditerranéens l'eau, entre guerre et paix*.  d. L'Harmattan, Paris, 217 p.
- DE JOUVENEL H. - 1999** - *La démarche prospective, un bref guide méthodologique*.  d. Futuribles. Vol. 247, 47-68 p.
- DELANNOY J.-J., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERRETTE Y. - 2001** - La cartographie morphologique souterraine : Apports aux reconstitutions paléogéographiques et paléoenvironnementales. Application à la Grotte Chauvet (Ardèche-France). *Quaternaire*, vol. 12, n  4, p. 235-248.

- DELANNOY J.-J. - 1997** - *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la Transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst.* Thèse d'Etat de l'Université Joseph Fourier Grenoble I, 678 p.
- DE ROSNAY J. - 1975** - Le Macroscopie. Vers une vision globale. *Points Essais*, 346 p.
- DIDON E. - 1990** - Systèmes d'Information Géographique : concepts, fonctions, applications. *CEMAGREF / ENGREF*, 44 p.
- DIRECTION DE LA CONSERVATION FONCIÈRE ET DES TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES - 1970** - Berkane, 1/100 000. *In feuille NI-30-XVI-4.* éd. Division de la carte. Rabat.
- DIRECTION DE LA CONSERVATION FONCIÈRE ET DES TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES - 1995** - Ahfir, 1/50 000. *In feuille NI-30-XVI-4d* éd. Division de la carte. Rabat.
- DIRECTION DES EAUX ET FORÊTS ET DE LA CONSERVATION DES SOLS. - 1981** - Inventaire et cartographie des périmètres de reboisement du nord du Maroc. Oujda. 64 p.
- DIRECTION PROVINCIALE DE L'AGRICULTURE D'OUDJA ARRONDISSEMENT DES EAUX ET FORÊTS. - 1995** - Etude de l'aménagement de la forêt domaniale de Béni Snassen. Oujda. 78 p.
- DIRECTION RÉGIONALE DES EAUX ET FORÊTS. - 1997a** - Carte de végétation Berkane 1/50 000.
- DIRECTION RÉGIONALE DES EAUX ET FORÊTS. - 1997b** - Carte de végétation El Ayoun 1/50 000.
- DIRECTION RÉGIONALE DES EAUX ET FORÊTS. - 2006** - Rapport sur les incendies de forêts dans la région de l'oriental (1997-2006), Oujda, 40 p.
- DIRECTION DU CADASTRE ET DE LA CARTOGRAPHIE - 1995** - Berkane, 1/50 000. *In feuille NI-30-XVI-4c.* éd. Division de la carte. Rabat.
- DÖRFLIGER N. - 2005** - Guide méthodologique, Cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique. Annexe au rapport BRGM/RP-53576-FR.
- DÖRFLIGER N., TACHE E., ZWAHLEN F. - 1996** - EPIK, une méthode pour cartographier la vulnérabilité des aquifères karstiques: application à deux sites dans le Jura suisse. Actes du colloque international ESRA 96, *L'eau souterraine en région agricole*, pp. 17-20.
- DÖRFLIGER N., ZWAHLEN F. - 1998** - Guide pratique - Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). *Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage*, pp. 1-50.
- DÖRFLIGER N., PLAGNES V. - 2009** - Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques, Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa, Rapport BRGM RP-57527-FR, 100 p.
- DUCHAUFOR P. - 2001** - *Pédologie : Sol, végétation, environnement.* Coll. Abrégés. Masson, 300 p.
- DUGOT P. (2001)** *L'eau autour de la Méditerranée.* éd. L'Harmattan, Coll. Pour comprendre, Paris, 190 p.
- DUGGEN S., HOERNLE K., BOGAARD Pvd., GARBE-SCHÖNBERG D. - 2005** - Post collisional transition from subduction- to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: evidence from continental-edge delamination of subcontinental lithosphere: *Journal of Petrology*, Vol. 46, pp. 1115-1201.
- DURAND J.H., GAUCHER G., LACROIX G., MATHIEU L., MERCIER J.L., VOGT T., WILBERT J. - 1979** - Premiers résultats des travaux du groupe de travail sur les accumulations calcaires, Strasbourg, 1975. *Bull. Ass. Sénégal. Etude Quat.*, 54/55, pp. 25-29.

E

- EL GAROUANI A., MERZOUK A., JABRANE R., BOUSSEMA M.R. - 2005** - Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le Pré-Rif Marocain. *Télédétection 2005*, Vol. 5, n° (1-2-3), pp. 69-80.
- EL GHALI A., EL KASSIMI A., GHANNAMI M. - 2004** - Stratégie d'amélioration du service de l'eau et impacts sur les performances de l'irrigation dans le périmètre de la Moulouya. *Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, Rabat.

- EL GOUT R., KHATTACH D., HOUARI M.-R. - 2009** - Etude gravimétrique du flanc nord des Béni Snassen (Maroc nord-oriental) : implications structurales et hydrogéologiques, *Bulletin de l'Institut Scientifique* n°31, pp. 61-75.
- EL HADI H., CHABANE A., HERTOGEN J., GIRET A. - 2000** - Place des massifs granitiques de Zekkara, Tarilest et Beni-Snassène dans la chaîne hercynienne (Meseta orientale, Maroc), *Géol. Méditerran.* XXVII (3-4), pp. 159-173.
- EL HADI H., TAHIRI A., REDDAD A. - 2003** - Les granitoïdes hercyniens postcollisionnels du Maroc oriental: une province magmatique calco-alcaline à shoshonitique. *C.R. Géoscience* 335, pp. 959-967.
- EL HAMMACHI F., TABYAOUI H., CHAOUNI A., AIT BRAHIM L., CHOTIN P. - 2006**- Mio-Pliocène tectonics in Moroccan Rifian Forland: coexistence of compressive and extensional structures, *Revista de la Sociedad Geológica de España* Vol. 19, n°1-2, pp. 143-152.
- EL KADMIRI A., ZIRI R., KHATTABI A. - 2004** - Analyse phytosociologique des formations de matorral du massif des Béni-Snassène (Maroc oriental). *Acta Botanica Malacitana* Vol. 29, pp. 67-87.
- El Mandour A. - 1998** - *Contribution hydrogéologique de la plaine des Triffa: salinisation et modélisation*. Thèse d'Etat d'Université Mohamed Ier, Fac. Sci, Oujda, 206 p.
- EMERSON W. W. - 1995** -. Water retention, organic C and soil texture. *Australian journal of soil research* Vol. 33, pp 241-251.
- ET-TOBI M., EZZAHIRI M., BELGHAZI B., QARRO M., BOUHALOUA M. - 2000** - Importance des parcours forestiers dans la région du Maroc oriental (Massifs forestiers de Debdou, El Ayat, Béni Snassen). Options Méditerranéenne, Série A/n°39, 2000. *Rupture: Nouveaux enjeux, nouvelles fonctions, nouvelle image de l'élevage sur parcours*. CIHEAM, pp. 185-189.

F

- FONDATION DAVID SUZUKI. - 2006** -. *L'eau que nous buvons : les normes et les recommandations en matière de la qualité de l'eau potable* – Une comparaison internationale. 45 p.

G

- GASQUET D., STUSSI J.M., NACHIT H. - 1996** - Les granitoïdes hercyniens du Maroc, dans le cadre de l'évolution géodynamique régionale. *Bull. Soc. géol. France*, n°167-4, pp. 517-528.
- GAUCHÉ É., - 2002** - *Les campagnes des Beni Saïd (Rif oriental, Maroc) : l'exemple de la crise d'une montagne et de son avant-pays*, Thèse de doctorat, Université Paris X-Nanterre, 2 volumes, 603 p.
- GAUCHE É. - 2003** - Crise d'un système agropastoral montagnard et recompositions spatiales : le territoire des Beni Saïd (Rif oriental, Maroc), *Actes du Colloque Crises et mutations des agricultures de montagne*, CERAMAC, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 12 et 13 décembre 2002, pp. 73-88.
- GAUCHE É. - 2005** - Les Beni Saïd (Rif oriental, Maroc), un territoire en recomposition et en quête d'aménagement, *Mutations des milieux ruraux dans les montagnes du Rif*, Groupe de Recherches Géographiques sur le Rif, Tetouan, p. 237-276.
- GAUCHE É. - 2005** - Recomposition et renouveau de campagnes menacées: le cas des Beni Saïd (Rif oriental, Maroc), *Annales de géographie* (n° 646), pp. 617-642.
- GAUCHE É. - 2010** - Le désenclavement des territoires ruraux marginalisés du Nord du Maroc : les conséquences de la nouvelle route côtière méditerranéenne dans le Rif oriental territoire des Beni Saïd », *Noréis* 214, pp. 68-84.
- GAUSSEN H., ROUX G. - 1958** - Précipitations annuelles, *Atlas du Maroc*, n°4 a Rabat.
- GENTIL L. - 1908** - Esquisse géologique du massif des Bni Snassen. *Bull. Soc. géol. France*. Série4, t.8, pp. 391 -417.
- GEORGE P. - 1970** - *les méthodes de la géographie*, Paris, PUF, coll. « Que sais-je ? ».

- GHAZI A. - 1987** - *Etude géomorphologique et hydrologique du massif de Berkane : (Maroc-Oriental)*, Thèse de Doctorat, Aix-Marseille II. 347 p.
- GOGU R., DASSARGUES A. - 1998** - A short review on groundwater vulnerability assessment. *Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop*, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse, pp. 1-19.
- GOGU R., DASSARGUES A. - 2000 a** - Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods. *Environ Geol* vol. 39(6), pp. 549-559.
- GOGU R., DASSARGUES A. - 2000 b** - Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, Southern Belgium. *Hydrogeol*, Vol. 8(3), pp. 337-345.
- GRASLAND C. - 1998** - la composante d'échelle dans l'analyse des distributions spatiales, application à la fécondité des régions européennes vers 1980, *Revue Belge de Géographie*, n°4, Belin, pp. 435-326.
- GUITOUNI A. - 1995a** - Le Maroc oriental de l'établissement du protectorat à la décolonisation : les mutations d'un carrefour ethnique frontalier. *Le territoire, lien ou frontière ?*, Paris.
- GUITOUNI A. - 1995b** - *Le Nord-Est marocain : réalités et potentialités d'une région excentrée*, Thèse de Doctorat d'État, décembre 1994, Université François Rabelais, Tours, 474 p.
- GUMUCHIAN H. - 2001** - Politique de l'eau et développement local. De la réflexion à l'action en milieu méditerranéen », *Actes du colloque «Politique de l'eau et développement local en milieu méditerranéen»*, Montpellier, 1er -2 mars 2001, 194 p.

H

- HAKIM B. - 1982** - *Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Syrie et Maroc*. Thèse de doctorat d'état de l'université d'Aix Marseille II, 701 p.
- HARVEY D. - 1969** - *Explantation in geography*, London, E. Arnold.
- HBERT J.-P. -1993- *la discontinuité critique*, Paris Publication de la Sorbonne.**
- HERVOUET Y. - 1985** - *Géodynamique alpine (Trias-actuel) de la marge septentrionale de l'Afrique, au Nord du bassin de Guercif (Maroc oriental)*. Thèse Sciences d'Université Pau et des pays de l'Adour, 367 p.
- HOEPFFNER C. - 1987** - *La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc*. Thèse es Sciences d'Université de Strasbourg, France, 280 p.
- HOFFMANN Y - 2000** - Influences climatiques et pression anthropique sur l'hydrologie des bassins karstiques des vallées de la Dordogne et du Lot : aide à l'aménagement et à la gestion de la qualité des ressources en eau ». In *Travaux du LGPA* n° 18. pp. 63-97.
- HUMBERT A. - 2003** - L'Anti-Atlas une montagne paysanne moribonde? *Acte colloque international : Crises et mutations des agricultures de montagne CERAMAC*, Presses universitaires Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, p. 61-72.

I

- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL. - 1946** - Taourirt 1/200 000. In *Feuille N°XI*, éd. IGNF.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL. - 1949** - Oujda 1/200 000. In *P 531 Feuille N° XII*, éd. IGNF.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL. - 1954** - Berkane 1/200 000. In *Feuille N° VII*, éd. IGNF.

J

- JAILLET S. - 2000** - *Le Barrois et son karst couvert, Structure, Fonctionnement, Evolution*. Thèse d'Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 2 t, 710 p.

JEANNIN P-Y., CORNATON F., ZWAHLEN F., PERROCHET P. - 2001 - VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment & validation. *7ème Colloque international d'hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré*, pp. 185-190.

K

KAHOUADJI A. - 1986 - *Recherches floristiques sur le massif montagneux des Beni-Snassene (Maroc oriental)*. Thèse d'Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 184 p.

KAVOURI K., PLAGNES V., DÖRFLIGER N., TREMOULET J., REJIBA F., MARCHET P. - 2011 - PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability – Application to the Ouyse karst system (southwest France), *Hydrogeology* Vol. 19, DOI 10.1007/s10040-010-0688-8.

KÉFI R., STEVANOVITCH A., BOUZAI D., BÉRAUD-COLOMB E. - 2005 - Diversité mitochondriale de la population de Taforalt (12,000 ans BP-Maroc): une approche génétique à l'étude du peuplement de l'Afrique du Nord, *Anthropologie* XVIII/1, pp. 1-11.

KHATTABI A. - 2003 - La récréation touristique dans la vallée de Zegzel. *Terre et Vie*, n° 72, pp. 1-3.

L

LALLEMEND-BARRES A. - 1994 - Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. *Etude documentaire préliminaire*. R37928. BRGM, pp. 1-17.

LALLEMEND-BARRES A., ROUX J.C. - 1989 - Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. BRGM, *Manuels et Méthodes*, 19, 224 p.

LAOUAR R., BOYCE A.J., AHMED-SAID Y., OUABADI A., FALLICK A.E., TOUBAL A. - 2002 - Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, northeast Algeria, *Journal of African Earth Sciences* 35, pp. 271-283.

LAOUINA A. - 1987a - *Dégradation du milieu et action anthropique : conséquences de l'exploitation agricole du sol dans le secteur Triffa-façade nord des Bni Iznassen, Maroc oriental*. éd. Centre national de coordination et de planification de recherche scientifique et technique. Rabat, 96 p.

LAOUINA A. - 1987b - *Le Maroc oriental : relief, modelé et dynamique du calcaire*. Thèse d'état, Pub. De l'Université d'Oujda (Maroc), 604 p.

LAOUINA A. - 1993 - Expériences de développement de la montagne rifaine, essai d'évaluation, *Travaux du laboratoire de géomorphologie de l'Université Mohammed V*, Rabat, n°2.

LAOUINA A. - 1998a - L'environnement des montagnes du Nord : atouts, contraintes et processus de dégradation, *Le développement du Maroc Septentrional, Points de Vue de Géographes*, Gotha-Nahost und Nordafrika, pp. 15-59.

LAOUINA A. - 1998b - Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. Bull., Réseau Erosion, n°18, Ed. IRD (ORSTOM), Montpellier, pp. 33-53.

LAOUINA A. - 2010 - Conservation des eaux et des sols au Maroc : prise en compte de la diversité géographique », *Noroi* 214, pp. 85-99.

LAOUINA A., CHAKER M., NACIRI R., NAFAR R. - 1993 - L'érosion anthropique en pays méditerranéen, le cas du Maroc septentrional. *Bull. Assoc., des géographes français*. n° 5, pp. 384-398.

LAZAAR M. - 1998 - *Le Maroc du Nord, de l'émigration internationale à l'intensification de l'exode rural*. Le développement du Maroc septentrional, Points de vue de géographes, Gotha- Nahost und Nordafrika, pp. 61-78.

LEDOUX B., HUBERT G. - 1999 - *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 231 p.

LEONE F., VINET F. - 2005 - La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. Collection « *Géorisques* » Vol. n°:1, pp. 9-25.

- LES ENFANTS DE L'ORIENTAL. - 1988** - *Oujda et sa région en cartes postales anciennes (1900-1950)*. éd. St-Germain-en-Laye, 178 p.
- LÉVY J., LUSSAULT M. - 2003** - *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. éd. Belin, 1033 p.
- LEYLAND R.-C. & WITTHÜSER K.-T. - 2010** - VUKA: a modified COP vulnerability mapping method for karst terrains in South Africa. Quarterly. *Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. Vol. 43, n°1, pp. 107-116.
- LOPEZ-GETA J.-A., ANDREO B., VIAS J., DURAN J.-J., CARRASCO F., JIMENEZ P. - 2004** - Aproximacion metodologica para evaluar la recarga en acu'iferos carbonaticos [Methodological approach to evaluate the recharge rate in carbonate aquifers]. *International Congress of IAH*, Zacatecas, Mexico.

M

- MAHLA N. - 1984** - *Evolution des structures sociales traditionnelles chez les Béni Snassen : étude sur la tribu et la famille*. Thèse de l'Université Paris V, 144 p.
- MARGAT J. - 1968** - *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution*. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.
- MARGAT J. - 2002** - Des pénuries d'eau sont-elles en perspective à long terme en Europe méditerranéenne? *Centre d'activités régionales, Plan d'action pour la méditerranée*, éd. Plan Bleu, Valencia, 19 p.
- MARGAT J. - 2004** - *Atlas de l'eau dans le bassin méditerranéen*. éd. UNESCO. Paris. 46 p.
- MARGAT J. - 2008** - *L'eau des Méditerranéens situation et perspectives*. éd. Harmattan, Prospective. Prospective appliquée. Paris, 288 p.
- MARHOUMI M.R. - 1984** - *Etudes palynologiques des séries dinantiennes de la Meseta marocaine. Conséquences stratigraphiques et structurales*. Thèse de doctorat 3ème cycle, Strasbourg, p 111.
- MARÍN A.-I., DÖRFLIGER N., ANDREO B. - 2010** - Comparative Application of Two Methods (COP and PaPRIKa) for Groundwater Vulnerability Mapping in the Lez Karst System (Montpellier, South France). *Advances in Research in Karst Media. Environmental Earth Sciences*, Part 1, pp. 329-334.
- MATHIEU C., RUELLAN A. - 1987** - Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride : l'exemple de la Basse Moulouya (Maroc). *Cahiers ORSTOM Pédologie*, 13, pp. 3-25.
- MEZRHAB A. - 1994** - *Croûtes calcaires, travertins et paléo environnements Quaternaires dans les Béni Snassen (Maroc nord oriental)*. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix Marseille I, 204 p.
- MEZRHAB A. - 2007** - *Dépôts fluviatiles holocènes, fragilité actuelle des paysages et risque d'érosion dans la chaîne des Bni Iznassen et ses bordures : caractérisation dynamiques et modélisation par SIG et télédétection spatiale*. Thèse d'Etat de l'Université Mohammed premier, Oujda, 461 p.
- MONITION L. - 1962** - Les formations Liasique des monts des Bni Snassen (Maroc Oriental). *Bull. Soc. Géol. France*, Paris, Série. 7, t.4, n°1, pp. 102 -108.
- MORVAN X., BRUAND A., COUSIN I., ROQUE J., BARAN N., MOUVET C. - 2004** - Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un bassin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert: Influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 11, pp. 117 135.
- MRINI Z., RAFI A., DUTHOU J.-L., VIDAL P. - 1992** - Chronologie Rb/Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc: conséquences. *Bull. Soc. Géol. France* 3, pp. 429-443.
- MUSSET R. - 1935** - Les calculs relatifs aux régimes pluviométriques, fraction pluviométrique, écart pluviométrique relatif, coefficient pluviométrique relatif. *Les Études rhodaniennes* Vol. 11, pp. 75-85.
- MUSY A., SOUTTER M. - 1991** - *Physique du sol, collection gérer l'environnement*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p.
- MUSY A., HIGY C. - 2004** - *Hydrologie une science de la nature*, Lausanne, Gérer l'environnement, 314 p.
- MUTIN G. - 2004** - Le défi de l'explosion démographique et l'accroissement des besoins économiques. *Les Cahiers de la Convention démocrate*, pp. 32-46.

- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES DE LA GÉOLOGIE. - 1982** - Carte géologie du Maroc 1/1 000 000. In *N°260*, éd. Service géologique du Maroc.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES DIRECTION DE LA GÉOLOGIE. - 2001** - Carte géologique de Berkane 1/50 000. In *notes et mémoires n° 425*, éd. Service géologique du Maroc.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES DIRECTION DE LA GÉOLOGIE - 2004** - Carte géologique d'Ahfir 1/50 000. In *Notes et mémoires n° 453*, éd. Service géologique du Maroc.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE - 1995c** - Etude de l'aménagement de la forêt domaniale de Bni Snassen (partie III) Gestion Antérieure, éd. Aboukassim S. A, p 17.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE - 1995a** - Etude de l'aménagement de la forêt domaniale de Bni Snassen (Partie I) Renseignements généraux, éd. Aboukassim S. A, p 79.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE - 1995b** - Etude de l'aménagement de la forêt domaniale de Bni Snassen (Partie II) Renseignements généraux et étude socio-économique, éd. Aboukassim S. A, p 100.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE – 1996** - Etude de l'aménagement de la forêt domaniale de Bni Snassen (partie IV) Etat actuel des forêts, éd. Aboukassim S. A, p 31.
- MINEFI-DREE. - 2005** - La réglementation en matière d'environnement au Maroc www.missioneco.org/maroc
- MRINI Z., RAFI A., DUTHOU J-L., VIDAL P. - 1992** - Chronologie Rb/Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc: conséquences. *Bull. Soc. Géol. France* 3, pp. 429-443.

N

- NACIRI T. - 1986** - *Etude litho stratigraphique et structurale des Béné Snassen (Maroc)*. Thèse 3e cycle. Pau. France, 236 p.
- NACIRI T. - 1994** - *Evolutions sédimentaires, environnements et contrôles dans le Lias-Dogger des Béné Snassen Orientaux (Maroc oriental)*. Doctorat ès-Sciences d'Université Mohamed I, Fac. Sci. Oujda, 243 p.
- NEJJARI A., DEVOS A. - 2000** - Spatialisation et cartographie des rendements dans le bassin du Haut Sebou, (Moyen Atlas, Maroc). *Mosella 2000 – tome XXV – N°3-4*, pp. 121-138.
- NEMES A., WÖSTEN J.H.M., LILLY A. - 2001** - Development of soil hydraulic pedotransfer functions on a european scale : their usefulness in the assessment of soil quality. *Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*, pp. 541-549.
- NEMES A., SCHAAP M., WÖSTEN J.H.M. - 2003** - Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, pp. 1093-1102.
- NICOD J. - 1977** - Genèse des formes de surface dans les régions de roches carbonatées. *Annales de Géographie*, Vol. 86, pp. 585 – 587.
- NICOD J. - 2009** - Carte des karsts autour de la Méditerranée et en Europe moyenne. *Karstologia* n°53, pp. 31-34.
- NUÑEZ LÓPEZ D., ALFONSO MUÑOZ ROBLES C., GADSDEN H., MANUEL REYES-GÓMEZ V. - 2006** - Caractérisation, à diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'État de Chihuahua (Mexique). *Sécheresse* Vol. 17, n° 4, pp 467-474.

O

- O'CONNOR M., REICHEL V., BUREUA P. - 2006** - *Deliberative sustainability assesement : multiple scales, multiple stakeholders, multidisciplinary and multiple bottom lines- A methodological study for Work Package WP6 of the SRDTOOLS Projet « Methods and tools for evaluating the impact of cohesion policies on sustainable developement »*, Guyancourt, C3ED, université de Versailles. Saint-quentin-en-Yvelines, 72 p.

- ORMVAM. - 1998** - La petite et moyenne hydraulique dans le périmètre de la Moulouya (province de Berkane), Berkane, 41 p.
- ORMVAM. - 2003** - Projet intégré de mise en valeur agricole de Zegzel: Diagnostic de la situation actuelle, Berkane, 56 p.
- OUAHABI B. - 1994** - *Le Lias Dogger inférieur des Béni Snassen orientaux et des Zekkara (Maroc oriental). Stratigraphie, paléontologie et dynamique du bassin. Comparaison avec les régions limitrophes*. Doctorat ès-Sciences d'Université Mohamed I. Fac. Sci. Oujda. Maroc.

P

- PETELET-GIRAUD E., DOERFLIGER N., CROCHET P. - 2000** -. RISKE: multicriteria assesment of karstic aquifer vulnerability mapping. Application to the Fontanilles and Cent-Fonts karstic aquifers (Herault, S.France). *Hydrogéologie* Vol. 4, pp. 71-88.
- PETELET-GIRAUD E., DOERFLIGER N, et CROCHET P. - 2000** - RISKE. Méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques. *ANTEA, BRGM (service EAU à Montpellier)*, 102 pp.
- PIQUE A. - 1994** - Géologie du Maroc. Les domaines régionaux et leur évolution structurale. éd. PUMAG, Marrakech, p 284.
- PITALÓPEZ M - 2000** - Un nouvel indice pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne), *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 13, pp. 225-233.
- PLAGNES N., THERY S., FONTAINE L., BAKALOWICZ M., DOERFLIGER N. - 2006** - Cartographie de la Vulnérabilité des Karsts : Evolution de la méthode RISKE. *Les ressources en eau en région karstique*, 4 et 5 mai, Rouen.
- POUQUET J. - 1952** - *Les monts du Tessala (chaînes sud-telliennes d'Oranie), essai morphogénétique*. éd. SÉDES, Paris, 351 p.
- PROVITOLO D. - 2007** - Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain, *Annales de Géographie*, n°653, pp. 23-41.

Q

- QUINIFY. - 1991** - Origine et signification des remplissages souterrains. *Actes des Journées P. Chevalier*, pp. 229-247.

R

- RAWLS, W.J., Brakensiek, D.L. - 1985** . - Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.B., Ward, T.J. (Eds.). *Proceedings Symposium Watershed Management in the Eighties*. April 30–May 1, 1985, Denver, CO, Am. Soc. Civil Eng., New York, NY, pp. 293–299.
- REDDAD A. - 1993** - *Etude pétrographique et géochimique des granitoïdes de Zekkara, Tarilest et Beni Snassene (Maroc oriental)*. Thèse de doctorat 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 169 p.
- REGHEZZA M. - 2005** - La vulnérabilité, un concept problématique», *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, Coll. Géorisques, n°1, pp. 35-40.
- RIAD S. - 2003** - *Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc*. Thèse en cotutelle, université des sciences et techniques de Lille et université Ibnou Zohr d'Agadir, 154 p.
- RIAUX J., BARBIER R., BARRETEAU O. - 2009** - Construire et argumenter des enjeux de vulnérabilité en comité sécheresse, éd. L'Harmattan, *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris, pp. 75-87.

ROCHE M. - 1963 - *Hydrologie de surface*. éd. Gauthier-Villars, 431 p.

ROGNON P. - 1996 - Sécheresse et aridité : leur impact sur la désertification au Maghreb. *Sécheresse*, Vol. 7, n°4, pp. 287-297.

ROQUES H. - 1967 - Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique. *Mémoires et Documents du Centre de recherches et de Documentation Cartographiques*. CNRS, vol. 4, *phénomènes karstiques*, pp. 112-141.

RUELLAN A. - 1970 - *Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes: les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental)*. Thèse Sci. Strasbourg - Mém. ORSTOM, n°54, 1971, 302 p.

S

SALOMON J.-N. - 2000 - *Précis de karstologie*. Presses Universitaires de Bordeaux (coll. « Scieteren »), Pessac, 251 p.

SAKHO A.M. - 1998 - Le système d'information géographique (SIG), l'hydrologie et la gestion des ressources en eau. *Word Meteorological organisation. Technical reports in hydrology and water resources*. N° 59, pp. 14.

SAXTON K.E., RAWLS W.-J. - 2006 - Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America*, 10 p.

SCAETTA H., SCHOEP A., MEURICE R. - 1937 - *La genèse climatique des sols montagnards de L'Afrique centrale. Les formations végétales qui en caractérisent les stades de dégradation*. Institut Royal Colonial Belge, Section des Sciences Naturelles et Médicales, Bruxelles, 349 p.

SCHAAP M. - 1999 - *Manual of Rosetta*, Rosetta v 1.0. Riverside, California. U.D Salinity Laboratory ARS-USDA. <http://www.ussl.ars.usda.gov/models/rosetta/rosetta.htm>

SCHAAP M., FEIKE L., VAN GENUCHTEN M.-TH. - 2001 - Rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, Vol. 251, pp 163-176.

SCHAAP M. - 2005 - Models for indirect estimation of soil hydraulic properties. *Encyclopedia of soil hydrological sciences*, pp.7.

SINAN M. - 2000 - *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique : application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc)*. Thèse de doctorat d'état es sciences. Ecole Mohammadia des Ingénieurs. Rabat, 371 p.

SNOUSSI M. - 2006 - *Revue de quelques éléments de base pour l'évaluation des débits environnementaux en Basse Moulouya*, Université Mohamed V, Rapport à l'Union mondiale pour la nature (UICN), 14 p.

STOURL., AGOUMIA. - 2008 - Sécheresse climatique au Maroc durant les deux dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée*, Vol. 16, pp. 215-232.

SOIL SURVEY STAFF. 1993. *Soil survey manual*. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA. *USDA-SCS Agricultural Handbook 430-V-SSM*, 503 p.

T

TAYEBI A. - 2007 - Création et évolution des formes exokarstiques et l'écosystème géomorphologie, végétation, sol dans le massif des Coulmes (Vercors). *Mémoire de Master 2*, université de Savoie. EDYTEM, 53 p.

TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., DELANNOY J.-J. - 2009 - L'influence de la sécheresse sur la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques d'une moyenne montagne méditerranéenne : exemple des Béni Snassen orientaux (MAROC). *Acte colloque international : Risques naturels en Méditerranée occidentale Carcassonne*. sous presse.

- TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., DELANNOY J.-J. - 2009** - L'utilisation des SIG pour l'étude de la vulnérabilité des eaux karstiques dans un milieu méditerranéen semi-aride : exemple des Béni Snassen orientaux (MAROC). *La quatrième session du congrès international Géotunis*. Apport des Technologies Géomatiques dans l'étude des ressources en eau et le suivi du phénomène de la désertification. Tunis
- TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., DELANNOY J.-J. - 2010** - Réflexion méditerranéenne pour l'analyse de la vulnérabilité des ressources en eau karstiques, exemple du massif des Béni Snassen orientaux (Maroc), *La cinquième session du congrès international Géotunis*, L'utilisation des SIG et la télédétection pour le développement durable. Tunis
- TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., BOUABDELLAH M., DELANNOY J.-J. - 2010** - Une méthode d'analyse de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques du massif des Bni Snassen (Maroc), *Réunion des Sciences de la Terre, Bordeaux, résumé n°640*, pp. 254.
- TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., BOUABDELLAH M. - 2010** -. Analyse spatiale de l'infiltration en domaine karstique méditerranéen de type semi-aride : cas du massif des Béni Snassen (Maroc nord oriental). *Karstologia*, n° 55, pp. 19-26.
- TAYEBI A., JAILLET S., GASQUET D., BOUABDELLAH M. - 2011**- Analyse temporelle de la vulnérabilité en milieu méditerranéen semi-aride : cas du massif des Béni Snassen (Maroc nord oriental). *Acte colloque international : 9e Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire*, pp. 463-466.
- TAZI SADEQ H - 2008** - *Du droit de l'eau au droit à l'eau au Maroc et ailleurs*. ed. Eddif. 476 p.
- TORBI A., GELARD J.P., - 1994** - Paléocontraintes enregistrées par la microfracturation, depuis l'Hercynien jusqu'à l'Actuel, dans les Monts du Sud-Est d'Oujda (Meseta orientale, Maroc), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, Vol. 318, p. 131-135.
- TORBI A. - 1996** - Stratigraphie et évolution structurale paléozoïque d'un segment de la Meseta orientale marocaine (Monts du Sud-Est d'Oujda): rôle des décrochements dans la formation de l'olistostrome intraviséen et le plutonisme tardi-hercynien, *Journal of African Earth Science*, Vol. 22, pp. 549-563.

V

- VAN GENUCHTEN M.-Th. - 1980** - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. Journal*. Vol. 44, pp. 892-898.
- VASSILIOS A.-T., RIZWAN H. - 1996** - Use of Geographic Information Systems (GIS). in Water Resources : A Review. *Water Resources Management*, n° 10, pp. 251-277.
- VIAS J.-M., ANDREO B., PERLES M.-J., CARRASCO F., VADILLO I., JIMENEZ P. - 2006** - Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*. Vol. 14, n° 6, pp. 912-925.
- VIDAL P. - 1952** - Particularités des aménagements au Maroc, *Revue Forestière Française*, Vol. 4, pp. 254-261.
- VIVIAN H. - 1977** - L'hydrologie nord-alpine et la sécheresse de 1976. *Revue de géographie de Lyon*, Vol. 52, n°2, pp. 117-151
- VOGT T. - 1989** - Quelques éléments de discussion au sujet des croûtes calcaires. *Annales de Géographie*, n°545, pp. 71 - 79.

W

- WOSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. - 1999** - « Development and use of a database of hydraulic properties of European soils ». *Geoderma* Vol. 90, pp. 169-185.

Y

YORO G., GODO G. - 1990 - Les méthodes de mesure de la densité apparente : Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cahiers ORSTM, séries Pédologie*, 1989-1990, Vol XXV, n°4, pp. 423-429.

Z

ZOUHRI M. - 1989 - Importance du secteur forestier dans la province d'Oujda, *ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, direction provinciale de l'agriculture d'Oujda, service forestier*, 76 p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : OUVRAGES HYDRAULIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA

(cf. introduction générale)

Ouvrages hydrauliques existants	Usages
Complexe hydraulique des barrages Mechraa Hammadi (1957) et Mohamed V (1967) sur la Moulouya	Irrigation des plaines de la basse Moulouya (Zebra et Triffa..) = 524 Mm3/an Alimentation en eau potable des villes de Berkane, Nador et agglomérations voisines = 30 Mm3/an Production de l'énergie électrique = 29 MW
Barrage Hassan II sur l'oued Za (1995)	Renforcement de l'irrigation le long de l'oued Za = 34 Mm3/an Volume réservé au renforcement de l'alimentation en eau potable des villes d'Oujda, El Ayoun et Taourirt = 38 Mm3/an
Barrages et lacs collinaires	Abreuvement du cheptel et protection de certaines agglomérations contre les inondations
Station de pompage Moulay Ali (1993)	Renforcement de l'irrigation dans la plaine des Triffa (basse Moulouya)

(D'après SNOUSSI, 2000)

ANNEXE 2 : BILAN RESSOURCES/BESOINS DANS LE BASSIN DE LA MOULOUYA, PROJECTION SUR 2020

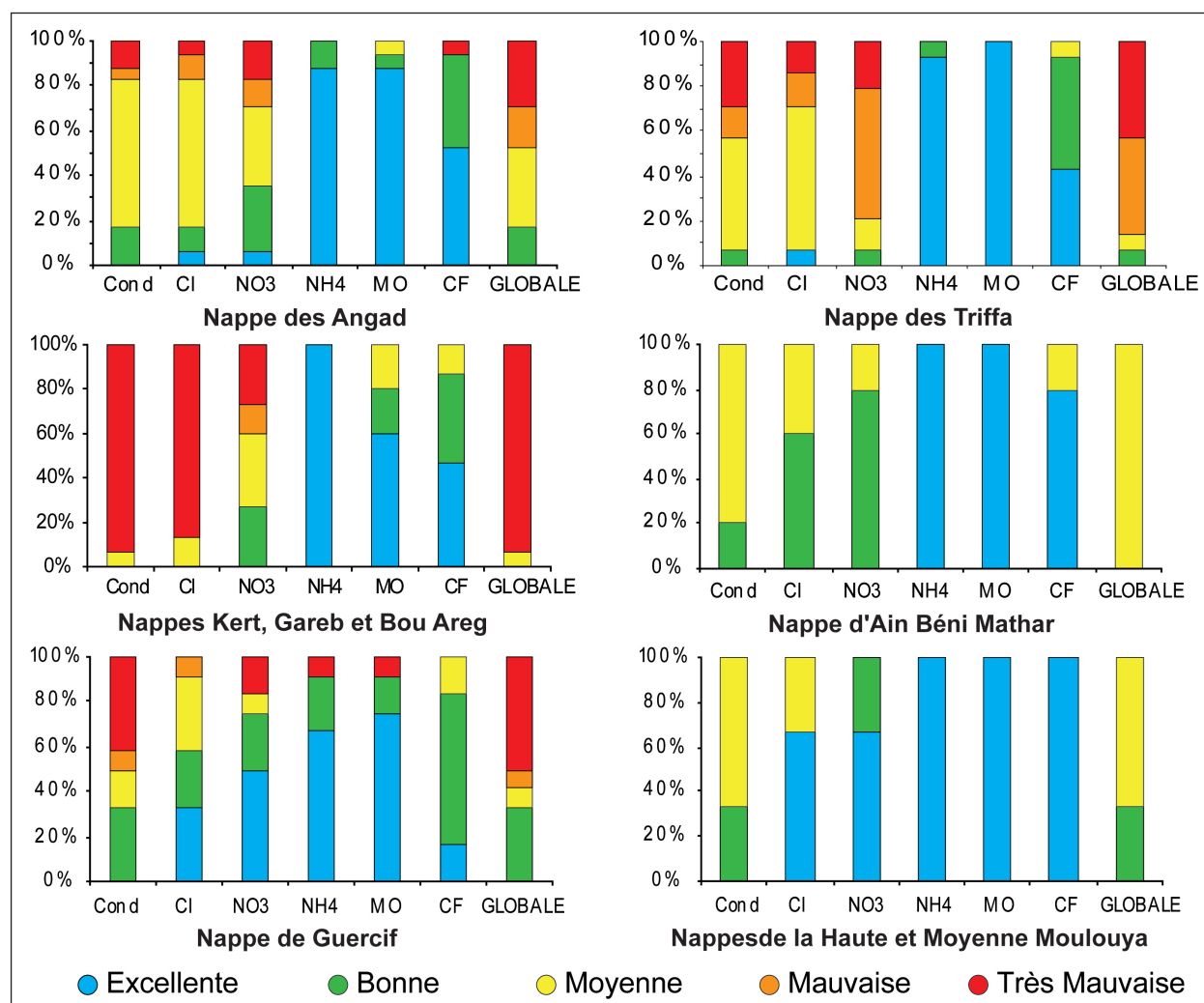
(cf. introduction générale)

	Mobilisation	Volume régularisé dans le système (Mm3/an)
Ressources	Barrages régulateurs existants	480
	Barrages projetés d'ici 2020	355
	Pompages Moulay Ali	95
	Total eaux de surface	930
	Eaux souterraines	500
	Total Ressources	1430
Besoins	Demande en eau potable et industrielle	148
	Demande en eau d'irrigation	1.458
	Total demandes	1.606
Bilan à l'horizon 2020		-176

(D'après SNOUSSI, 2000)

ANNEXE 3 : QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA (2001/2008)

(cf. introduction générale)



Source : (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement, 2008)

Les points de suivi des eaux souterraines sont au nombre de 67. Ils sont répartis sur 7 nappes : les Angad, Triffa, Kert-Gareb et BouAreg, Beni Mathar, Guercif, Moyenne Moulouya et Haute Moulouya (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement 2008).

Nappe des Angad

Les mesures effectuées, durant la période d'observation 2001/ 2008, sur les eaux souterraines de la plaine des Angad révèlent que 21% des puits contrôlés affichent une qualité très mauvaise, 19% mauvaise, 48% moyenne et 12% bonne. Cette dégradation est due à la forte minéralisation de ces eaux et la présence de nitrates en teneurs élevées. L'origine de cette pollution est liée essentiellement aux activités agricoles et aux rejets domestiques.

Nappe des Triffa

Les mesures de la période 2001/2008 mettent en évidence la dégradation des eaux souterraines de la plaine des Triffa. 46% des points contrôlés sont de très mauvaise qualité, 24% ont une mauvaise qualité, 21% affichent une qualité moyenne, seulement 9% présentent une bonne qualité. Ces statistiques relèvent la dégradation des eaux de la nappe des Triffa. Cette dégradation est due principalement aux activités agricoles.

Nappes Kert, Gareb et Bouareg

Les nappes de Kert, Gareb et Bouareg restent très problématiques. 81% des 75 puits contrôlés ont une qualité très mauvaise. La qualité moyenne occupe la deuxième position avec 13%. Les eaux de mauvaises qualités présentent 4%. Les paramètres responsables de cette dégradation sont les chlorures et les nitrates.

Nappe Ain Béni Mathar

L'aquifère d'Ain-Beni-Mathar se développe dans les formations calcaires dolomitiques du Jurassique. Il constitue un riche potentiel hydraulique pour la région aride des Hauts plateaux. Il s'étend sur une superficie de 7000 km², il est considéré comme la deuxième nappe jaillissante dans le jurassique du Maroc après le Saïs.

Les mesures révèlent une qualité moyenne des eaux de la nappe de 83 %. 10 % des puits contrôlés ont une bonne qualité. Seulement, 7% sont de mauvaise qualité.

Nappe de Guercif

Pour les nappes d'eaux souterraines des plaines Jel, Tafrata et Guercif, la campagne 2001/2008, montre que les eaux ont une qualité moyenne de 45%. 26% affichent une bonne qualité, 16% ont une mauvaise qualité, 13% très mauvaise qualité.

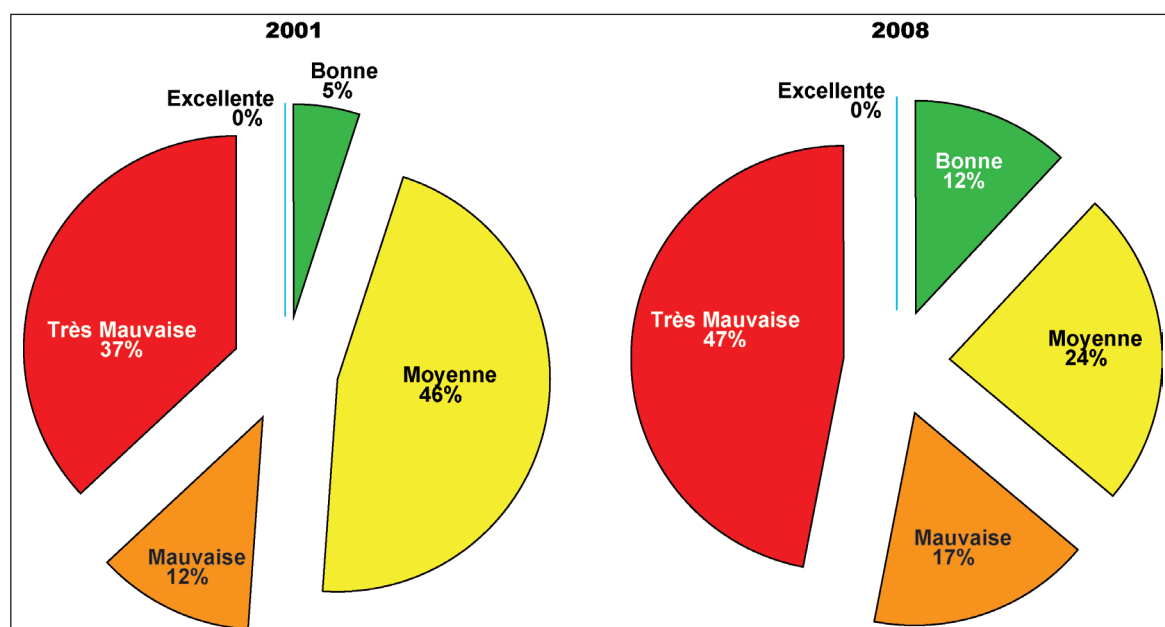
Nappes de la Haute et la Moyenne Moulouya

Les trois points suivis au niveau de la Haute et de la Moyenne Moulouya sont de bonne à moyenne qualité.

La qualité des eaux souterraines de l'ensemble du bassin versant de la Moulouya est très préoccupante. 40% des eaux souterraines analysées affichent une très mauvaise qualité, 36% une moyenne qualité et 15% une mauvaise qualité. Les eaux de bonne qualité sont seulement de 10%. Les nappes les plus affectées sont Kert-Gareb et BouAreg, Triffa et Angad. Cette dégradation est liée à la forte pression anthropique qui s'exprime par différentes actions : développement urbain, activités industrielle et agricole notamment l'irrigation entraînant des rejets liquides et solides... pour les nappes de la haute et moyenne Moulouya et Ain Béni Mathar la qualité d'eau reste assez acceptable.

ANNEXE 4 : EVOLUTION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOULOYA (2001/2008)

(cf. introduction générale)

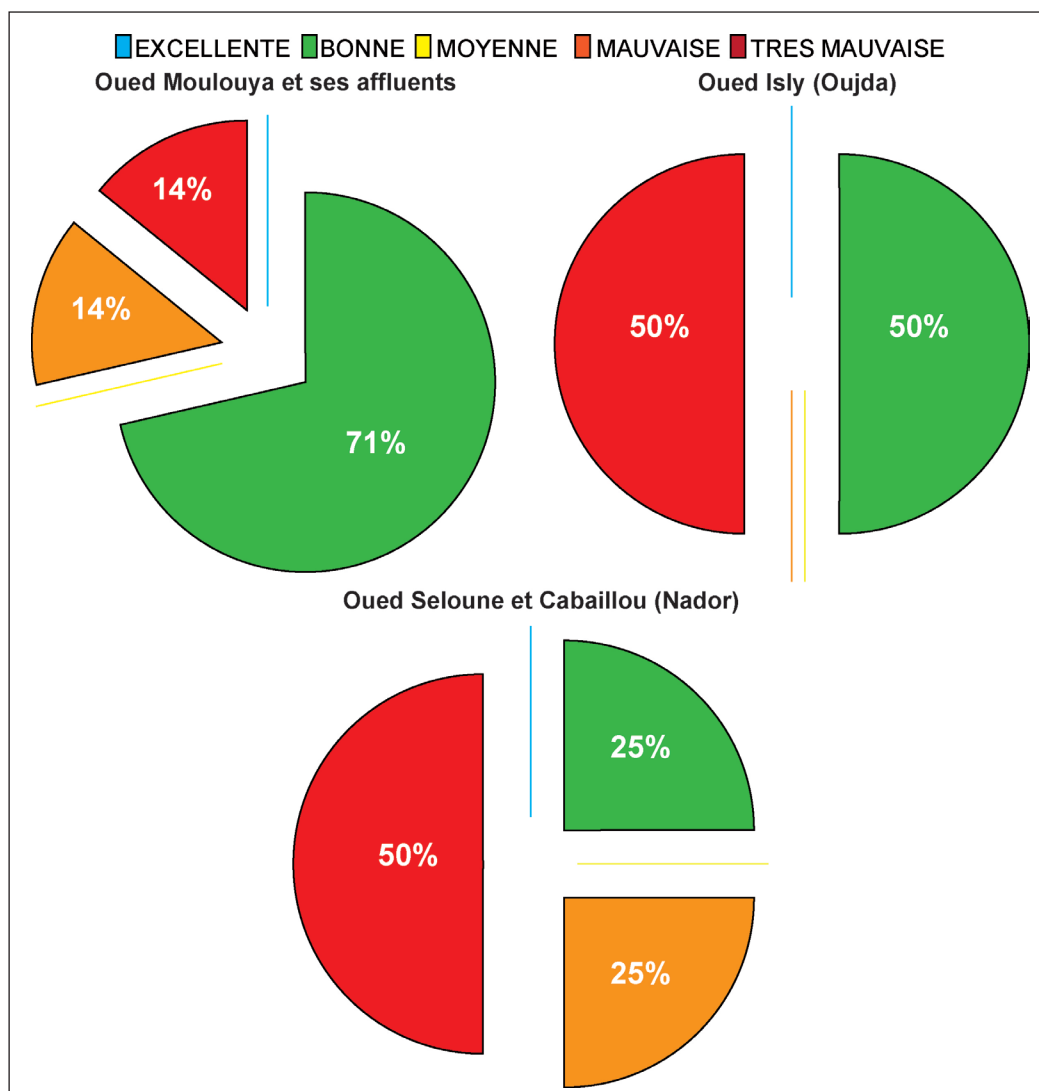


Source : (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement, 2008)

En 2001, les eaux de très mauvaise et mauvaise qualité présentaient 37 et 12% respectivement. Ces valeurs ont augmenté en 2008 pour atteindre 47% et 17%. En revanche les eaux de moyenne qualité ont connu une baisse avec 46% en 2001 et 24% en 2008. Seules les eaux de bonne qualité ont évolué positivement de 5% en 2001 et 12% en 2008.

ANNEXE 5 : QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA (2001/2008)

(cf. introduction générale)



Source : (Ministère de l'aménagement du territoire de l'Eau et de l'Environnement, 2008)

La qualité des eaux de surface observée durant la période 2001/2008 est très variable selon la pression anthropique. La totalité des oueds sont affectés par les rejets urbains et industriels.

La qualité globale du cours d'eau de la Moulouya et ses affluents reste dans l'ensemble bonne exceptés les points touchés par les rejets urbains des villes Missour et Outat Haj.

Quant à l'Oued Isly, la qualité des eaux est bonne en amont de la ville d'Oujda. Elle devient très mauvaise en aval suite aux rejets urbains.

Les sous bassins versants de la région de Nador (Oued Selouane et Cabaillou) sont de très mauvaise à mauvaise qualité suite aux rejets industriels et urbains.

Les retenues de barrages ont une qualité d'eau généralement bonne. En amont du barrage Mohamed V, les eaux de la Moulouya et de ses affluents sont de bonne qualité, par exemple les eaux de la retenue Mohamed V ont une salinité de l'ordre de 1g/l (SNOUSSI, 2000).

ANNEXE 6 : ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN ORIENTAUX (2008/2009)

(cf. chapitre 1 : Hydrochimie)

ECHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN

Mesures physico-chimiques in situ

Paramètres à mesurer in situ :

- Température ;
- Conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$, pour une T° référence de 25°C ;
- pHmètre.

Etalonner les différents appareils de mesures pHmètre (solution tampon 7, puis 4) ; conductimètre (solution concentré de KCL).

Prélèvement des éléments majeurs pour analyse au laboratoire

Les éléments majeurs analysés sont : Alcanité $\approx \text{HCO}_3^-$, Anions : Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} ; Cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ .

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées à l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya à Oujda.

ANALYSE AU LABORATOIRE

Bleu : sources karstiques, jaune : sources issues des basaltes, orange : sources issues des schistes

P08 : printemps 2008, A08 : automne 2008, P09 : printemps 2009, A 09 : automne 2009

Source	T°C	pH	Cond.	HCO_3^- mg	Cl^- mg	NO_3^- mg	NO_2^- mg	SO_4^{2-} mg	Ca^{2+} mg	Mg^{2+} mg	NH_4^+ mg	Na^+ mg	K^+ mg
Zegzel_P08	22,1	7,1	653	262,30	36,99	11,71	0,00	45,39	47,29	45,20	0,01	18,40	1,33
Zegzel_A08	25,3	7,1	761	244,00	1,64	11,52	0,00	62,02	96,19	15,55	0,00	32,80	1,67
Zegzel_P09	24,1	7,1	636	305,00	47,54	10,44	0,00	43,15	79,15	6,32	0,00	62,00	1,00
Zegzel_A09	25,3	7,6	784	317,20	53,12	12,66	0,00	44,16	80,12	6,80	0,00	63,00	1,67
Halouma_P08	23,5	7,1	588	274,50	34,99	12,96	0,00	69,16	55,31	31,59	0,04	20,00	1,33
Halouma_A08	23,7	6,9	734	305,00	1,13	10,89	0,00	87,52	104,21	11,66	0,00	31,20	2,00
Halouma_P09	22,1	7,0	647	317,20	40,14	10,66	0,00	48,96	70,18	21,87	0,00	30,00	1,33
Halouma_A09	23,5	7,4	797	311,10	31,99	8,44	0,00	47,56	73,45	19,80	0,00	25,20	2,00
Iralouchene_P08	23,2	7,1	791	311,10	84,97	15,13	0,00	62,73	56,11	27,70	0,01	54,00	2,00
Iralouchene_A08	21,5	7,1	837	305,00	1,92	13,34	0,00	44,27	96,19	15,55	0,00	40,00	2,00
Iralouchene_P09	22,5	7,0	842	335,50	77,12	9,92	0,00	46,92	54,67	35,48	0,00	48,00	1,33
Iralouchene_A09	22,3	7,5	861	359,90	68,98	10,55	0,00	47,13	62,10	37,65	0,00	45,00	1,33
Tarbajjit_A08	18,3	7,5	788	329,40	1,13	25,62	0,00	22,24	101,00	11,66	0,00	16,40	1,67
Tarbajjit_P09	18,3	7,2	724	244,00	44,37	23,21	0,00	21,62	46,51	32,08	0,00	22,00	1,33
Tarbajjit_A09	18,7	7,7	784	396,50	37,50	25,32	0,00	19,20	55,11	39,73	0,01	28,00	1,66
Tiffasseur_P08	17,8	7,2	671	372,10	39,99	14,64	0,00	15,71	86,57	17,50	0,00	18,00	1,33
Tiffasseur_A08	18,5	7,3	752	311,10	1,35	17,72	0,00	27,13	64,93	30,62	0,00	17,00	1,00
Tiffasseur_P09	17,7	7,0	722	305,00	40,14	15,09	0,00	30,40	26,11	49,57	0,00	24,00	1,00

Annexes

Tiffasseur_A09	18,2	7,5	796	427,00	33,98	14,77	0,00	29,58	88,18	29,16	0,01	30,00	1,00
Tidest_A08	17,6	7,3	794	323,30	1,10	21,94	0,00	23,66	51,30	34,02	0,00	17,00	1,33
Tidest_P09	18,5	7,0	775	396,50	53,88	18,99	0,01	33,86	48,96	75,33	0,00	18,40	1,00
Tidest_A09	16,7	7,6	796	445,30	44,98	16,46	0,00	32,98	50,24	71,10	0,01	19,60	1,33
Tafouralt_P08	18,4	7,3	577	451,40	43,99	24,73	39,59	2,24	121,84	34,99	0,00	16,20	1,00
Tafouralt_A08	17,5	6,85	802	250,10	0,87	25,74	0,00	26,52	56,11	31,59	0,00	16,40	1,33
Tafouralt_P09	18,4	6,7	835	439,20	58,10	27,32	0,01	20,09	92,21	33,53	0,00	26,00	1,33
Tafouralt_A09	17,4	7,3	827	439,20	29,00	5,28	0,00	12,08	104,28	27,33	0,00	17,60	1,00
Elarbi_A08	17,7	7,4	711	256,20	1,47	11,44	0,02	69,67	40,08	38,88	0,00	33,60	1,67
Elarbi_P09	21,3	7,6	674	378,20	43,31	1,48	0,00	17,65	55,49	49,57	0,00	16,20	0,67
Elarbi_A09	19,0	8,2	661	414,80	39,99	1,90	0,00	17,52	88,18	28,43	0,00	17,60	1,00
Walout_A08	20,5	7,1	745	262,30	1,55	16,46	0,01	40,80	49,70	25,27	0,00	34,40	2,00
Walout_P09	21,5	7,2	852	317,20	113,04	12,03	0,00	34,48	89,76	18,95	0,00	64,00	2,67
Walout_A09	22,3	7,9	883	341,60	94,97	8,44	0,00	36,13	98,70	20,17	0,00	36,00	3,00
Jawanie_P08	18,9	7,0	674	335,50	39,99	16,67	35,99	28,25	88,98	23,81	0,00	19,00	1,00
Jawanie_A08	19,8	7,0	688	183,00	0,87	17,51	0,00	40,80	48,10	19,44	0,00	16,80	1,00
Jawanie_P09	20,3	7,2	681	420,90	46,48	25,00	0,00	28,46	79,97	34,99	0,00	32,00	1,33
Jawanie_A09	20,3	7,1	703	359,90	42,75	23,21	0,00	30,20	80,12	29,16	0,00	22,40	1,67
Ifri_P08	20,8	7,2	436	298,90	39,99	8,82	35,99	21,62	96,19	19,44	0,01	14,40	1,33
Ifri_A08	20,6	6,9	624	274,50	0,90	14,64	0,01	27,95	38,48	27,22	0,00	15,60	0,67
Ifri_P09	22,0	7,1	597	323,30	42,26	10,34	0,00	19,28	103,63	14,09	0,00	14,40	1,00
Ifri_A09	20,1	7,2	603	353,80	29,99	14,77	0,00	21,12	104,21	12,15	0,00	15,00	1,33
Jamaa_P08	18,4	7,2	599	366,00	39,99	7,32	35,99	9,49	58,52	25,27	0,01	52,00	1,00
Jamaa_A08	16,7	7,1	677	335,50	0,93	9,33	0,01	22,44	27,25	48,60	0,00	40,00	0,67
Jamaa_P09	20,3	7,3	635	396,50	47,54	7,39	0,06	8,06	49,78	31,10	0,01	62,00	0,67
Jamaa_A09	18,3	7,5	667	396,50	34,99	6,33	0,00	9,11	58,50	32,56	0,01	34,80	1,00
Drawi_A08	17,7	7,3	650	305,00	0,56	3,97	0,00	21,83	96,19	19,44	0,00	10,40	0,33
Drawi_P09	20,7	7,3	618	366,00	38,03	9,28	0,00	15,30	89,76	29,16	0,00	14,60	0,67
Drawi_A09	18,5	7,9	626	372,10	29,99	10,76	0,00	16,20	92,18	21,87	0,00	17,60	1,00
Ihadadene_A08	18,2	7,4	757	341,60	0,76	13,29	0,00	48,14	71,34	34,51	0,00	42,40	1,33
Ihadadene_P09	19,4	7,3	672	439,20	42,26	6,33	0,00	12,75	81,60	26,73	0,00	36,00	1,00
Ihadadene_A09	16,6	7,7	688	427,00	34,99	8,44	0,00	13,20	99,25	17,59	0,00	24,00	1,33
Tafrawt_A08	16,6	7,0	615	329,40	1,18	9,24	0,00	21,62	88,18	8,26	0,00	15,60	0,33
Tafrawt_P09	21,7	7,4	609	347,70	32,75	3,27	0,01	11,73	53,86	31,10	0,00	24,00	1,00
Tafrawt_A09	18,0	7,8	652	378,20	29,99	27,43	0,00	21,30	72,94	31,59	0,00	23,40	1,67
Jemel_A08	19,6	7,6	342	170,80	0,56	13,88	0,00	20,40	40,08	19,44	0,00	11,20	0,67
Jemel_P09	19,7	7,4	315	176,90	21,13	14,24	0,01	11,22	32,64	21,87	0,00	10,40	0,67
Jemel_A09	18,5	8,1	351	201,30	17,99	15,82	0,00	11,65	33,20	20,41	0,00	13,40	1,33
Hajla_P08	17,4	7,9	285	225,70	27,99	9,12	25,19	4,49	48,10	24,30	0,01	13,40	0,67
Hajla_A08	17,3	7,4	381	213,50	0,56	10,93	0,01	20,40	32,06	20,41	0,00	13,00	0,33
Hajla_P09	20,4	7,5	363	189,10	27,47	5,49	0,02	6,63	28,56	29,16	0,01	13,00	0,33
Hajla_A09	17,3	8,0	386	286,70	20,99	5,68	0,00	7,12	32,00	32,11	0,01	15,60	0,67
Mahdaoui_P08	17,6	7,5	380	366,00	23,99	14,31	21,59	4,49	68,94	39,85	0,01	8,60	0,67
Mahdaoui_A08	13,1	7,2	499	268,40	0,54	10,63	0,04	22,85	48,10	29,16	0,00	7,60	1,00
Mahdaoui_P09	17,9	7,2	513	317,20	23,24	16,46	0,00	10,51	48,96	38,88	0,00	7,40	0,33
Mahdaoui_A09	13,0	7,6	512	292,80	19,99	15,82	0,00	12,11	52,14	36,21	0,00	11,20	0,67
Zaryouh_P08	18,0	7,4	597	298,90	31,99	6,46	28,79	5,51	101,00	5,83	0,00	3,80	1,33
Zaryouh_P09	19,9	7,5	560	353,80	40,14	1,37	0,00	6,12	56,30	29,16	0,00	28,00	0,67
Zaryouh_A09	18,0	8,1	597	347,70	31,99	1,48	0,00	7,15	61,72	34,51	0,00	24,80	1,33
Talba_P08	18,1	7,2	675	378,20	39,99	13,10	0,00	14,89	56,11	36,45	0,01	20,00	1,00
Talba_A08	17,7	7,1	754	347,70	1,10	14,39	0,00	36,72	102,60	10,69	0,00	16,40	1,67
Talba_A09	18,1	7,6	794	378,20	4,00	10,30	0,00	21,10	80,16	19,44	0,00	16,80	1,66

Vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Béné Snassen (Maroc oriental). Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes «SIG»

Tarilass_P08	14,9	7,5	557	305,00	19,99	3,71	17,99	5,00	52,10	21,38	0,00	15,00	0,67
Tarilass_A08	16,4	7,0	599	323,30	1,04	8,90	0,00	32,23	87,37	15,55	0,00	18,80	1,00
Tarilass_A09	15,6	7,9	593	372,10	2,50	11,25	0,00	18,13	96,19	14,58	0,00	8,80	1,00
Tardanaj_P08	18,0	7,9	341	305,00	23,99	12,91	21,59	11,02	56,11	26,24	0,02	18,00	0,33
Tardanaj_A08	14,8	7,3	643	311,10	0,56	4,47	0,01	23,66	40,88	25,76	0,00	29,60	0,67
Tardanaj_P09	19,4	7,0	463	280,60	26,41	13,61	0,00	10,00	60,38	11,18	0,00	26,00	0,33
Tardanaj_A09	17,8	7,8	485	274,50	20,99	15,82	0,00	10,11	61,20	11,30	0,00	18,00	0,33
Mahlou_P08	18,1	7,9	793	298,90	72,98	12,87	65,68	46,10	118,64	8,26	0,01	26,00	4,33
Mahlou_A08	14,1	7,3	760	329,40	0,71	23,25	0,01	42,84	80,16	21,87	0,00	44,00	1,00
Mahlou_P09	17,6	7,5	800	414,80	81,34	12,66	0,00	35,19	78,34	45,68	0,00	44,00	1,67
Mahlou_A09	16,7	8,2	801	427,00	63,38	15,19	0,00	37,10	85,77	41,31	0,00	27,80	2,00
Boubzar_A08	17,1	7,6	577	262,30	0,62	9,58	0,00	24,68	51,30	32,08	0,00	32,00	0,67
Boubzar_P09	18,8	7,6	578	329,40	52,82	7,49	0,00	11,12	65,28	34,51	0,00	22,00	1,00
Boubzar_A09	18,0	8,2	592	372,10	38,99	8,65	0,00	13,41	60,92	35,96	0,00	23,40	1,33
Lahedarra_P08	17,0	7,7	576	311,10	26,99	5,82	24,29	7,04	80,96	13,61	0,00	16,00	1,00
Lahedarra_A08	14,0	6,9	595	298,90	0,73	5,40	0,00	32,23	83,37	24,79	0,00	14,40	0,33
Lahedarra_P09	18,0	7,1	557	372,10	28,52	2,74	0,04	7,24	89,76	24,30	0,01	13,40	0,67
Ihadadene_A09	16,6	7,7	688	427,00	34,99	8,44	0,00	13,20	99,25	17,59	0,00	24,00	1,33
Madrara_A08	16,3	7,2	490	189,10	1,52	14,85	0,00	20,81	32,06	30,13	0,00	35,20	1,67
Madrara_P09	24,6	7,5	427	213,50	52,82	21,31	0,00	8,16	26,93	34,02	0,00	36,00	1,67
Madrara_A09	18,5	7,9	489	201,30	49,98	18,99	0,00	9,13	40,08	25,27	0,00	27,20	2,00
Jamaa Dix_P08	17,7	7,4	1198	323,30	124,96	171,17	0,00	117,50	90,58	36,45	0,01	112,00	9,33
Jamaa Dix_A08	14,8	7,4	1706	305,00	4,79	193,28	0,02	85,68	120,24	54,43	0,00	56,80	10,33
Jamaa Dix_P09	19,4	7,4	1487	359,90	182,76	149,81	0,01	129,03	96,29	76,30	0,00	80,00	9,67
Lahri_P09	25,3	7,2	529	335,50	25,35	1,16	0,00	21,42	57,94	25,76	0,00	20,00	0,33
Lahri_P08	17,5	7,8	395	341,60	39,99	1,90	35,99	8,16	68,94	34,99	0,01	16,60	0,33
Lahri_A08	14,0	8,0	554	317,20	0,56	1,98	0,01	23,05	41,68	33,05	0,00	16,40	0,33
Lahri_A09	16,0	8,0	561	366,00	20,99	1,69	0,00	20,89	76,95	26,24	0,01	23,00	0,33
Louzzate_A08	6,8	9,8	1160	353,80	2,26	37,68	0,00	97,10	65,73	48,60	0,00	48,00	2,00
Louzzate_P09	24,6	6,8	1134	451,40	102,47	47,69	0,01	116,59	124,03	59,78	0,00	34,00	1,67
Louzzate_A09	18,8	7,3	1090	457,50	77,98	40,09	0,00	114,38	144,29	45,20	0,00	33,20	2,00
Source_P08	17,6	7,0	569	347,70	34,99	5,42	0,00	12,75	60,92	21,38	0,01	46,40	1,00
Source_A08	15,5	7,0	640	323,30	0,87	7,39	0,01	23,46	72,14	31,59	0,00	31,20	1,33
Source_P09	22,9	7,1	619	353,80	42,26	1,58	0,00	18,87	65,28	34,51	0,00	42,00	1,33
Source_A09	17,7	7,3	639	366,00	34,99	2,32	0,00	19,30	85,77	21,87	0,00	26,00	1,67

Analyste : Asmaa TAYEBI 2008-2009.

Laboratoire : Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (Oujda).

ANNEXE 7 : LE RAPPORT Mg^{2+}/Ca^{2+} DES PRINCIPALES SOURCES DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN ORIENTAUX (2008/2009)

(cf. chapitre 1 : Hydrochimie)

Bleu : sources karstiques, jaune : sources issues des basaltes, orange : sources issues des schistes

	Printemps 2008			Automne 2008			Printemps 2009			Automne 2009		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Ca ²⁺
Zegzel	2,36	3,72	1,58	4,80	1,28	0,27	3,88	0,52	0,13	3,93	0,63	0,16
Halouma	2,76	2,60	0,94	5,20	0,96	0,18	3,44	1,80	0,52	3,60	1,70	0,47
Iralouchene	2,80	2,28	0,81	4,80	1,28	0,27	2,68	2,92	1,09	3,04	3,16	1,04
Tiffasseur	4,32	1,44	0,33	3,24	2,52	0,78	1,28	4,08	3,19	4,32	2,48	0,57
Tafouralt	6,08	2,88	0,47	2,80	2,60	0,93	4,52	2,76	0,61	5,11	2,09	0,41
Jawanie	4,44	1,96	0,44	2,40	1,60	0,67	3,92	2,88	0,73	3,93	2,47	0,63
Ifri	4,80	1,60	0,33	1,92	2,24	1,17	5,08	1,16	0,23	5,11	1,09	0,21
Jamaa	2,92	2,08	0,71	1,36	4,00	2,94	2,44	2,56	1,05	2,87	2,73	0,95
Tarilass	2,60	1,76	0,68	4,36	1,28	0,29			0,00	4,72	1,28	0,27
Hajla	2,40	2,00	0,83	1,60	1,68	1,05	1,40	2,40	1,71	1,57	2,67	1,70
Mahdaoui	3,44	3,28	0,95	2,40	2,40	1,00	2,40	3,20	1,33	2,56	3,02	1,18
Zaryouh	5,04	0,48	0,10			0,00	2,76	2,40	0,87	3,03	2,89	0,96
Tidest			0,00	2,56	2,80	1,09	2,40	6,20	2,58	2,46	5,90	2,39
ElArbi			0,00	2,00	3,20	1,60	2,72	4,08	1,50	4,32	2,42	0,56
Walout			0,00	2,48	2,08	0,84	4,40	1,56	0,35	4,84	1,66	0,34
Jemel			0,00	2,00	1,60	0,80	1,60	1,80	1,13	1,63	1,71	1,05
Drawi			0,00	4,80	1,60	0,33	4,40	2,40	0,55	4,52	1,88	0,42
Ihadadene			0,00	3,56	2,84	0,80	4,00	2,20	0,55	4,87	1,53	0,32
Tafrawt	3,80	2,12	0,56	4,40	0,68	0,15	2,64	2,56	0,97	3,58	2,66	0,75
Tarbajjit			0,00	5,04	0,96	0,19	2,28	2,64	1,16	2,70	3,32	1,23
Tardanaj			0,00	2,04	2,12	1,04	2,96	0,92	0,31	3,00	0,98	0,33
Mahlou	2,80	2,16	0,77	4,00	1,80	0,45	3,84	3,76	0,98	4,20	3,48	0,83
Boubzar	5,92	0,68	0,11	2,56	2,64	1,03	3,20	2,84	0,89	2,99	3,01	1,01
Lahdara			0,00	4,16	2,04	0,49	4,40	2,00	0,45	4,42	2,08	0,47
Madrara	4,04	1,12	0,28	1,60	2,48	1,55	1,32	2,80	2,12	1,96	2,12	1,08
Jamaa Dix	4,52	3,00	0,66	6,00	4,48	0,75	4,72	6,28	1,33			0,00
Lahri	3,44	2,88	0,84	2,08	2,72	1,31	2,84	2,12	0,75	3,77	2,23	0,59
Louzzate			0,00	3,28	4,00	1,22	6,08	4,92	0,81	7,07	3,85	0,54
Source	3,04	1,76	0,58	3,60	2,60	0,72	3,20	2,84	0,89	4,20	1,88	0,45

Analyste : Asmaa TAYEBI 2008-2009.

Laboratoire : Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (Oujda).

ANNEXE 8 : SYNTHÈSE DE LA BASE DE DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES DES SOLS, d'après (RUELLAN, 1971 ; BOUMEAZA, 1985)

(cf. chapitre 2 : Sol)

Roche en place	Type	Texture	Structure	Epaisseur
Schistes	Régosols très érodé	Texture grossière avec des limons, sable et peu d'argile		0 à 30 cm
	Sol rouge fersiallitique	Sablo-limono-argileuse et caillouteuse	Granulaire	100 cm
	Sol sur altérites	Limono-argileuse à sableuse		90 cm
	Sol fersiallitique hydromorphe	Argilo-limoneuse	Polyédrique à grumeleuse	100 cm
	Sol rouge fersiallitique à caractère vertique	Sableux à Sablo-argileuse	polyédrique	Peut atteindre 90 cm
Basaltes	Régosols érodés sur basaltes	Limoneuse à sablo-limoneuse, peu argileuse	Granulaire	0 à 20 cm
	Rendzine caillouteuse sur dolomie et basalte		Granulaire	Peu épais
	Sol brun fersiallitique sur basaltes	Limono-sablo-argileuse	Grumeleuse	100 cm
Calcaires dolomitiques	Lithosols			
	Sol rouge fersiallitique très décapé sur calcaire dolomitique			Variable selon les formes karstiques
	Sol brun rouge fersiallitique lessivé sur calcaire dolomitique	Argilo-limoneuse		100
	Sol brun rouge fersiallitique encoûté sur dolomie	Argileuse à argilo-limoneuse		100 cm Variable
	Rendzine encroûtée humifère	Argileuse à argilo-limoneuse	Grumeleuse à fine grenue	25 cm
	Rendzine à encroûtement calcaire	Argilo-limoneuse	Finement grenue	50 cm
	Rendzine sableuse humifère	sableuse		
	Sol fersiallitique lessivé sur grès dolomitique et calcaire	Sablo-argileuse	Grumeleuse non calcaire	140 cm
	Rendzine ravinée sur marne est marno-calcaire	Très limoneuse		0 à 20cm
	Rendzines colluviale caillouteuses peu encroûtée			
	Sol brun calcaire en encroûtement calcaire peu profond sur marne calcaire			
	Sol brun calcaire à caractère vertique			
	Sol limoneux d'apport alluvial	Sableux limoneux peu argileux		

ANNEXE 9 : FONCTIONS DE PÉDOTRANSFERT (SPAW, ROSETTA, HYPRES ET SOLHYDRO 1.0)

(cf. chapitre 2 : Sol)

Spaw

La fonction de pédotransfert de Spaw est une mise à jour de la fonction de pédotransfert de (SAXTON., RAWLS 2006).

Les équations utilisées sont les mêmes que pour (SAXTON., RAWLS 2006), mais elles incorporent l'équation améliorée de la conductivité de (RAWLS *et al.*, 1985) combinée à la densité volumique, à la teneur en caillou et à la salinité du sol. Un jeu de donnée considérable de caractéristiques du sol a été obtenu du laboratoire du département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA : United States Département of Agriculture), constitué d'environ 2 000 échantillons d'horizons A et 2 000 échantillons d'horizons B-C. Les données de l'horizon B-C contiennent moins de matières organiques que l'horizon A. Quand on combine les deux horizons, l'effet de la matière organique est masqué car la matière organique et la texture sont des variables qui affectent la teneur en eau du sol ; donc on utilise seulement les données de l'horizon A pour développer les équations de régressions. Les échantillons avec des valeurs extrêmes sont omis. Sont exclus du modèle, les échantillons qui ont des valeurs de densité volumique $< 1 \text{ gr/cm}^3$ et $> 1.9 \text{ gr/cm}^3$, des valeurs de matières organiques $> 8 \%$, des valeurs de teneur en argile $> 60 \%$.

Le fichier excel permettant les calculs est téléchargeable avec l'article de (SAXTON *et al.*, 2006) sur le site du département de l'agriculture des Etats-Unis : <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>

Rosetta

La fonction de pédotransfert Rosetta a été développée par (SCHAAP *et al.*, 2001) avec l'appui de 3 bases de données différentes:

La série de données pour les valeurs de rétention d'eau contient 2 134 échantillons de sols pour un total de 20 574 points de mesures. La plupart des échantillons sont dérivés de sols provenant d'un climat tempéré à subtropical du Nord de l'Amérique et de l'Europe.

Les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation sont disponibles pour 1 306 échantillons de sols.

La dernière base de données est exclusivement dérivée de la base de donnée UNSODA (UNsaturated SOil hydraulic DAtabase) et concerne les valeurs de la conductivité hydraulique insaturée est connue pour 235 échantillons de sols avec un total de 4 117 points de mesures.

Rosetta cherche en fait à établir des relations entre les paramètres d'entrée classique (texture, matière organique...) et les paramètres des équations de Van Genuchten. Ci-dessous un extrait de la publication de SCHAAP *et al.*, 2001, qui permet d'expliquer les équations utilisées par le modèle Rosetta.

Hydraulic functions used by Rosetta

The present version of Rosetta is capable of predicting van Genuchten (1980) water retention and unsaturated hydraulic conductivity parameters, as well as to provide estimates of saturated hydraulic conductivity, K_s . The van Genuchten water retention function is given by:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}}$$

where $\theta(h)$ represents the water retention curve defining the water content, θ (cm^3/cm^3), as a function of the soil water pressure head h (cm), θ_r and θ_s (cm^3/cm^3) are residual and saturated water contents, respectively, while α ($1/\text{cm}$) and n are curve shape parameters. This equation can be rewritten to yield the relative saturation, S_e :

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{1/n-1}$$

This equation is used in conjunction with the pore-size distribution model by Mualem (1976) to yield the van Genuchten-Mualem model (van Genuchten, 1980):

$$K(S_e) = K_o S_e^L \{1 - [1 - S_e^{m/(n-1)}]^{1-1/n}\}^2$$

in which K_o is the matching point at saturation (cm/day) and similar, but not necessarily equal, to the saturated hydraulic conductivity, K_s . The parameter L (-) is an empirical pore tortuosity/connectivity parameter that is normally assumed to be 0.5 (Mualem, 1976). Rosetta predicts L which will be negative in most cases. Although this leads to some theoretical complications, negative L give far better results (cf. Kosugi, 1999; Schaap and Leij, 1999).

Rosetta est basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN : Artificial Neuronal Network) plutôt que sur des équations de régression. Ce réseau consiste en un ensemble d'éléments de calcul simples appelés noeuds ou neurones. Le plus souvent, les ANN sont utilisés pour caractériser les relations « entrées/sorties ». Un neurone a des entrées multiples mais une sortie unique. Dans un neurone chaque donnée d'entrée est pondérée et combinée pour produire une valeur unique. Rosetta utilise les tables, logiciel de gestion de base de données ACSESS-97, pour stocker les données.

Rosetta comprend 5 modèles différents, selon les données disponibles (SCHAAP; 1999). Le modèle le plus simple est une classe de fonction de pédotransfert qui fournit des valeurs moyennes de la conductivité hydraulique à saturation grâce au modèle de Van Genuchten (GENUCHTEN; 1980) et de la teneur en eau du sol à saturation (paramètres hydrauliques) pour chaque classe texturale de la base de données USDA. Les 4 autres modèles sont basés sur un réseau neuronal artificiel qui consiste en une approche hiérarchique qui permet de prédire les paramètres hydrauliques (conductivité hydraulique et teneur en eau à saturation) avec des données d'entrées supplémentaires (texture, densité volumique, 1 ou 2 points de mesure de rétention d'eau), et de les prédire avec beaucoup plus d'exactitude. Le deuxième modèle nécessite les données d'entrées de la teneur en sable, limon, et argile (SSC = Sand, Silt, Clay). Le troisième nécessite en plus des données d'entrées du second modèle, la densité apparente (SSCBD = Sand, Silt, Clay et Bulk Density). Le quatrième et le cinquième modèle prennent en compte respectivement 1 ou 2 points de mesure de rétention d'eau. Les 5 modèles ont été calibrés sur le même ensemble de données et fournissent des prédictions cohérentes. La calibration a été établie sur des échantillons prélevés en

région tempérée de l'hémisphère Nord. La prédiction des paramètres hydrauliques sur des données de sols issues d'autres zones climatiques peut s'avérer inexacte, puisque ces sols auront subis une pédogenèse différente.

Le modèle Rosetta se présente sous la forme d'une interface graphique simple d'utilisation et qui peut être téléchargé sur le site de Salinity Laboratory (US) : <http://www.ussl.ars.usda.gov/>.

Exemple de sortie du modèle ROSSETA

Entrée du modèle

Sortie du modèle

Teneur en eau vs potentiel hydrique

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}}$$

Conductivité vs potentiel hydrique

$$K(S_e) = K_o S_e^L \{1 - [1 - S_e^{m/(n-1)}]^{1-1/n}\}^2 \quad S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{1/n-1}$$

Hypres

Les données source de ces fonctions de pédotransfert ont été collectées par des institutions en Belgique, au Danemark, en France, en Allemagne, en Grèce, en Italie, aux Pays-Bas, au Portugal, en Ecosse, en Angleterre, au Pays de Galles, et au Nord de l'Irlande, en Slovaquie, en Espagne et en Suède (WOSTEN *et al.*, 1998). Il y a 5 521 échantillons de sol provenant de 4 486 horizons issus de 1 777 lieux de mesures qui constituent la base de données HYPRES (HYdraulic PROperties of European Soils). La base de données représente 95 types de sols selon la légende de sol de la FAO et des mesures des deux paramètres recherchés (rétention d'eau et conductivité hydraulique) ont été faites sur 1 136 horizons de la base de donnée. Cette base est appelée à s'enrichir de nouvelles données dans les années à venir. Les sols des différentes nations sont très inégalement représentés, il en va de même pour les différents types de sols dans chaque pays.

De la base de donnée HYPRES découle une classe de pédotransfert et une fonction de pédotransfert continue. La classe de pédotransfert de Nemes prédit pour chaque classe texturale une moyenne des caractéristiques hydrologiques. Premièrement, elle utilise les paramètres de Mualem Van Genuchten pour déterminer la rétention et la conductivité pour chaque horizon de sol à 14 forces de succion différentes. Puis, les horizons sont rangés parmi 11 classes texturales, basée sur le triangle de texture des sols européens. Ci-dessous, sont présentées les équations de la fonction de pédotransfert d'Hypres.

Continuous pedotransfer functions for the prediction of hydraulic properties	
$\theta_s = 0.7919 + 0.001691 \cdot C - 0.29619 \cdot D - 0.000001491 \cdot S^2 + 0.0000821 \cdot OM^2 + 0.02427 \cdot C^{-1} + 0.01113 \cdot S^{-1} + 0.01472 \cdot \ln(S) - 0.0000733 \cdot OM \cdot C - 0.000619 \cdot D \cdot C - 0.001183 \cdot D \cdot OM - 0.0001664 \cdot \text{topsoil} \cdot S$	
($R^2 = 76\%$)	
$\alpha^* = -14.96 + 0.03135 \cdot C + 0.0351 \cdot S + 0.646 \cdot OM + 15.29 \cdot D - 0.192 \cdot \text{topsoil} - 4.671 \cdot D^2 - 0.000781 \cdot C^2 - 0.00687 \cdot OM^2 + 0.0449 \cdot OM^{-1} + 0.0663 \cdot \ln(S) + 0.1482 \cdot \ln(OM) - 0.04546 \cdot D \cdot S - 0.4852 \cdot D \cdot OM + 0.00673 \cdot \text{topsoil} \cdot C$	
($R^2 = 20\%$)	
$n^* = -25.23 - 0.02195 \cdot C + 0.0074 \cdot S - 0.1940 \cdot OM + 45.5 \cdot D - 7.24 \cdot D^2 + 0.0003658 \cdot C^2 + 0.002885 \cdot OM^2 - 12.81 \cdot D^{-1} - 0.1524 \cdot S^{-1} - 0.01958 \cdot OM^{-1} - 0.2876 \cdot \ln(S) - 0.0709 \cdot \ln(OM) - 44.6 \cdot \ln(D) - 0.02264 \cdot D \cdot C + 0.0896 \cdot D \cdot OM + 0.00718 \cdot \text{topsoil} \cdot C$	
($R^2 = 54\%$)	
$l^* = 0.0202 + 0.0006193 \cdot C^2 - 0.001136 \cdot OM^2 - 0.2316 \cdot \ln(OM) - 0.03544 \cdot D \cdot C + 0.00283 \cdot D \cdot S + 0.0488 \cdot D \cdot OM$	
($R^2 = 12\%$)	
$K_s^* = 7.755 + 0.0352 \cdot S + 0.93 \cdot \text{topsoil} - 0.967 \cdot D^2 - 0.000484 \cdot C^2 - 0.000322 \cdot S^2 + 0.001 \cdot S^{-1} - 0.0748 \cdot OM^{-1} - 0.643 \cdot \ln(S) - 0.01398 \cdot D \cdot C - 0.1673 \cdot D \cdot OM + 0.02986 \cdot \text{topsoil} \cdot C - 0.03305 \cdot \text{topsoil} \cdot S$	
($R^2 = 19\%$)	
θ_s is a model parameter, α^* , n^* , l^* and K_s^* are transformed model parameters in the Mualem-van Genuchten equations; C = percentage clay (i.e., percentage < 2 μm); S = percentage silt (i.e., percentage between 2 μm and 50 μm); OM = percentage organic matter; D = bulk density; topsoil and subsoil are qualitative variables having the value of 1 or 0; and \ln = natural logarithm.	

Solhydro1

Avec un jeu de donnée comparable mais uniquement français et uniquement pour estimer les capacités de rétention en eau à différents potentiels. (AL MAJOU *et al.*, 2007) ont développées des FPT à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 par régression multilinéaire pour les 7 valeurs de teneur en eau q1.0, q1.5, q2.0, q2.5, q3.0, q3.5, q4.2. De telles FPTC ont été fréquemment utilisées dans la littérature. Elles ont ici la forme :

$$\theta = a + (b \times \%Ar) + (c \times \%Li) + (d \times \%CO) + (e \times Da)$$

avec la teneur en eau volumique à une valeur de potentiel donnée, $\%Ar$ et $\%Li$, le pourcentage de la teneur en argile et en limon, $\%CO$, la teneur en carbone organique, Da la densité apparente de l'horizon et a , b , c , d et e , les coefficients de la régression multilinéaire.

Les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) texturales développées avec SOLHYDRO 1.0, sont données dans le tableau suivant :

		Potentiel de l'eau (hPa)						
		-10	-33	-100	-330	-1000	-3300	-15000
Tous horizons (n = 320)	a	0.4701 ***	0.3556 ***	0.2620 ***	0.1301 ***	0.0184	-0.0504	-0.0786 **
	b	0.0026 ***	0.0029 ***	0.0034 ***	0.0038 ***	0.0045 ***	0.0047 ***	0.0045 ***
	c	0.0006 ***	0.0008 ***	0.0012 ***	0.0012 ***	0.0008 ***	0.0005 ***	0.0003 ***
	d	-0.0006	-0.0002	0.0002	0.0010	0.0017 ***	0.0012 **	0.0004
	e	-0.1447 ***	-0.0939 ***	-0.0647 ***	-0.0084	0.0398 *	0.0697 ***	0.0710 ***
	R ²	0.59	0.64	0.69	0.74	0.77	0.82	0.86
Horizons de surface A et L (n = 90)	a	0.1553 *	0.1159	0.0204	-0.0722	-0.2026 ***	-0.1912 ***	-0.0737 *
	b	0.0023 ***	0.0023 ***	0.0027 ***	0.0033 ***	0.0044 ***	0.0045 ***	0.0038 ***
	c	0.0008 ***	0.0010 ***	0.0014 ***	0.0016 ***	0.0011 ***	0.0005 ***	0.0002 **
	d	0.0040 **	0.0041 ***	0.0041 ***	0.0037 ***	0.0044 ***	0.0037 ***	0.0020 ***
	e	0.0294	0.0384	0.0676 *	0.1032 ***	0.1613 ***	0.1463 ***	0.0672 ***
	R ²	0.56	0.62	0.75	0.81	0.83	0.87	0.90
Horizons de subsurface E, Bet C (n = 230)	a	0.5917 ***	0.5167 ***	0.4272 ***	0.2820 ***	0.1831 ***	0.0756 *	-0.0379
	b	0.0023 ***	0.0027 ***	0.0031 ***	0.0037 ***	0.0043 ***	0.0045 ***	0.0045 ***
	c	0.0006 ***	0.0008 ***	0.0011 ***	0.0010 ***	0.0007 ***	0.0005 ***	0.0004 ***
	d	-0.0023 *	-0.0026 **	-0.0023 *	-0.0020	-0.0018	-0.0014	1*10 ⁻⁵
	e	-0.2113 ***	-0.1849 ***	-0.1564 ***	-0.0919 ***	-0.0502 *	-0.0006	0.0453 **
	R ²	0.64	0.69	0.69	0.72	0.74	0.79	0.83

$\theta = a + (b \times \%Ar) + (c \times \%Li) + (d \times \%CO) + (e \times Da)$ avec θ teneur en eau volumique à une valeur de potentiel.
*** P = 0.001 ** P = 0.01 * P = 0.05

ANNEXE 10 : PROCEDURES D'ANALYSES DES SOLS EN LABORATOIRE

(cf. chapitre 2 : Sol)

Tout d'abord nous avons passé les échantillons à l'étuve à une température inférieure à 100°C pour l'évaporation de l'eau. Ensuite nous avons tamisé les échantillons à 0.2 cm, avec un broyage éventuel sans casser les cailloux. L'objectif est d'éliminer les éléments de grande taille.

La perte au feu (PF) à 550 °C

Le but de cette manipulation est de réduire la matière organique en gaz pour déterminer son pourcentage massique. Il faut donc procéder de la manière suivante :

Peser les nacelles (parfaitement sèches) une par une.

Peser les nacelles après ajout de l'échantillon de sol (<0.5 g).

Régler le four à 550°C avec un temps de montée de 1h00 et un temps de chauffe stable de 2h00.

Insérer les nacelles dans le four.

Sortir les échantillons après refroidissement du four.

Peser les nacelles+sol.

Conserver le tout.

Résultat :

$$\% \text{ MO} = \{(\text{poids de nacelle+sol en g}) - (\text{poids de nacelle+sol en g après le PAF } 550^{\circ}\text{C})\} / \text{poids du sol en g.}$$

La perte au feu (PF) à 950 °C

Le but est de réduire la matière organique et les carbonates en gaz pour déterminer leur pourcentage massique. Il faut donc procéder de la manière suivante :

Régler le four à 950°C avec un temps de montée de 1h00 et un temps de chauffe stable de 2h30.

Récupérer les nacelles+sol.

Insérer les nacelles dans le four.

Sortir les échantillons après refroidissement du four.

Peser les nacelles+sol.

Résultat 1 :

$$\% \text{ MO+carbonates} = \{(\text{poids de nacelle+sol en g}) - (\text{poids de nacelle+sol en g après le PAF } 950^{\circ}\text{C})\} / \text{poids du sol en g.}$$

Résultat 2 :

$$\% \text{ carbonates} = (\% \text{ MO}) - (\% \text{ MO+carbonates}).$$

pH

pH (H₂O)

Le but est de se renseigner sur la teneur approximative de carbonates. La manipulation de se présente la manière suivante :

Insérer 2g l'échantillon de sol dans 20ml de l'eau osmosée.

Agiter 10 minutes.

Mesurer le pH.

Résultat :

Connaître la concentration en H⁺ libre

pH (KCl)

Le but est de se renseigner sur la teneur approximative de carbonates. La manipulation est la même que le pH (H₂O), en remplaçant l'eau par une solution de KCl.

Résultat :

Connaître la concentration en H⁺ libre et H⁺ liés au CAH

La densité apparente

La densité apparente (da) permet de calculer la porosité, d'apprécier indirectement la perméabilité et la réserve en eau du sol. Elle a été évaluée au laboratoire. Sur le terrain, le prélèvement a été effectué à l'aide de petits cylindres en acier de volume connu (100 m³). Alors que le poids est évalué au laboratoire après séchage et pesée. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation suivante (YORO *et al* 1989-1990) :

$$da = P/V$$

Avec

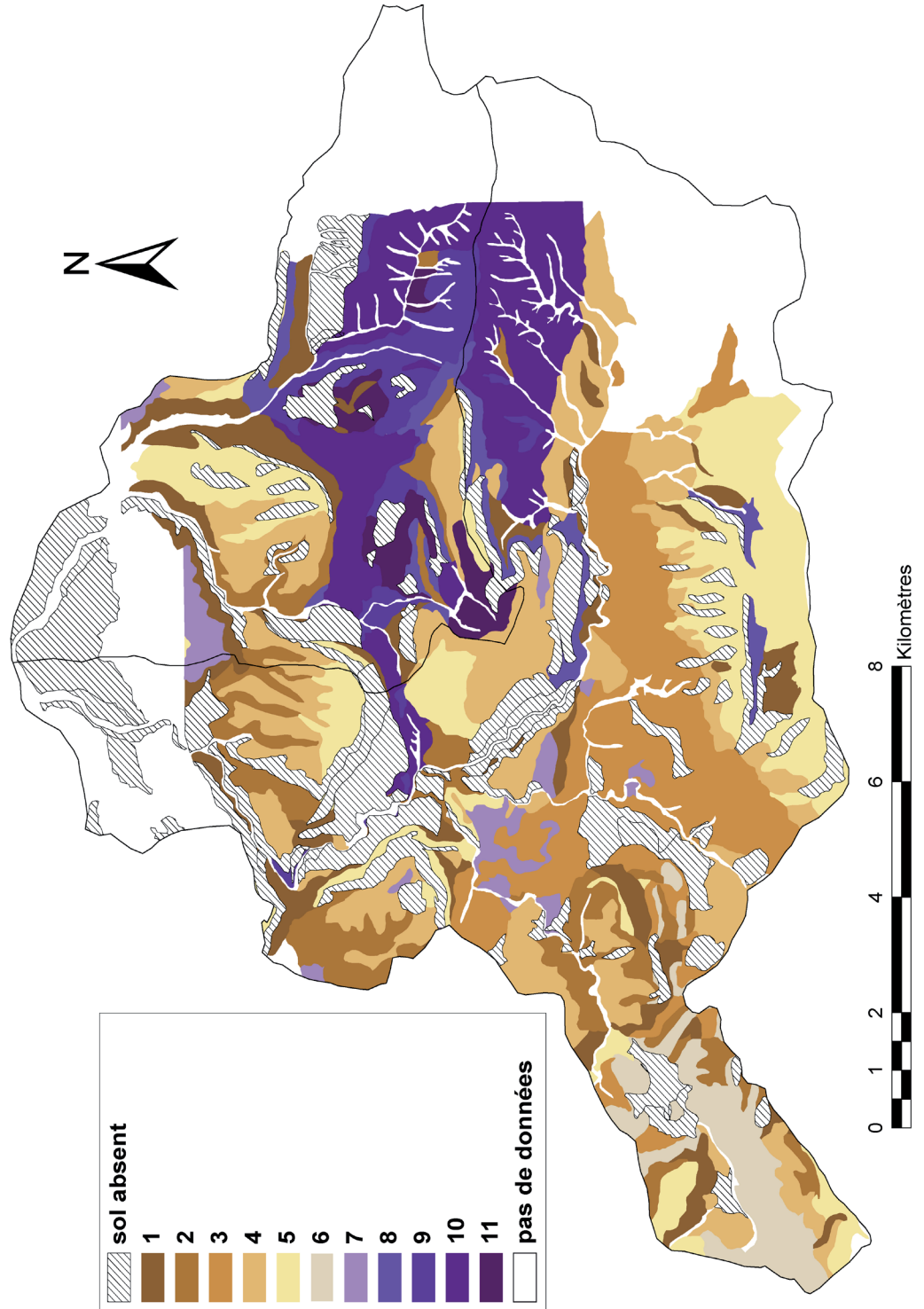
P = le poids sec de l'échantillon.

V = le volume de l'échantillon prélevé et séché.

ANNEXE 11 : CARTE DES SOLS SELON LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (TEXTURE, MATIÈRE ORGANIQUE, DENSITÉ APPARENTE)

Les numéros correspondent aux échantillons de sols

(cf. chapitre 2 : Sol)



ANNEXE 12 : GRANULOMÉTRIE DE SOLS ÉCHANTILLONNÉS (MASSIF DES BÉNI SNASSEN MAI 2010)

(cf. chapitre 2 : Sol)

Type	N° sol	Horizon	N° échantillon	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier
Rendzine colluviale	1	A	1	18,68	24,26	14,74	41,79	0,51
Rendzine encroûtée humifère	2	A	2	13,87	18,49	18,03	48,43	1,17
		B	3	17,31	22,75	17,81	41,94	0,17
Rendzine ravinée sur marno-calcaire	3	A	4	13,21	20,71	21,32	44,76	0
Rouge fersiallitique lessivé sur marno-calcaire	4	E	5	25,98	29,65	19,87	24,49	0
		E	6	19,52	24,82	19,7	35,96	0
		Bt	7	20,66	29,56	25,12	24,65	0
Sol rouge fersiallitique décapé sur calcaires dolomitiques	5	B	8	8,22	13,29	17,12	59,4	2,01
Sol rouge fersiallitique sur grès dolomitiques	6	A	9	9,38	15,08	14,14	60,82	0,59
		B	10	10,48	16,94	15,99	55,23	1,39
Rendzine brune humifère sur calcaire dolomitique	7	IB	11	10,74	16,29	14,94	55,38	2,64
		IIA	12	13,52	18,35	17,65	50,34	0,14
		IIB	13	14,67	16,65	16,21	51,07	1,37
Brun humifère sur basaltes	8	A	14	8,07	13,41	15,06	60,56	2,88
Rouge fersiallitique sur schistes altérés	9	A	15	15,15	26,84	23,02	34,99	0
		B	16	22,15	32,36	22	23,47	0
Rouge fersiallitique sur schistes	10	A	17	13,24	21,61	17,93	46,3	0,94
		B	18	14,3	25,67	19,95	40,06	0
		B	19	19,59	31,45	18,96	29,99	0
sol brun rouge fersiallitique sur calcaires dolomitiques	11	B	20	10,27	15,65	16,38	56,66	1,05

ANNEXE 13 : HISTORIQUE DE LA LÉGISLATION FORESTIÈRE AU MAROC

(cf. chapitre 2 : Végétation)

Situation avant 1912

La structure juridique du régime foncier marocain avant le protectorat français (1912), reposait sur des principes religieux. Dans tous les pays musulmans, la loi islamique a considéré les forêts comme « terres mortes » c'est-à-dire comme un bien appartenant à toute la communauté.

Dans la religion musulmane, celui qui vivifie une terre en devient propriétaire sauf s'il s'agit d'une forêt, car les forêts fournissent le bois de chauffage et le pacage et ont par conséquent une utilité générale.

L'imam (ou le sultan), représentant à la fois le chef temporel et le chef religieux, a été considéré comme un intendant chargé de gérer les terres de la communauté musulmane et éventuellement de les répartir entre ses membres (BOULHOL, 1952). Avant 1912 dans certaines régions marocaines, les populations rurales respectaient le caractère communautaire, mais le plus souvent, notamment dans les montagnes les paysans exploitaient la forêt d'une façon abusive : coupes désordonnées, pâturage, différentes utilisations du bois, défrichement, etc. Ceci montre que les droits d'usage étaient indéterminés et incontrôlés.

Situation depuis 1912

Le premier novembre 1912, une circulaire du Grand Vizir aux gouverneurs, caïds et cadis, fondée sur les principes de droit musulman, déclarait, après avoir énuméré les biens constituant le domaine public de droit inaliénable : « *Il est d'autres biens qui ne peuvent être en aucune façon aliénés qu'avec l'autorisation du Makhzen (Etat), parce qu'il a sur ces biens des droits de propriété ou de contrôle ; ce sont : les forêts qui, dans toute l'étendue de l'Empire, appartiennent au Makhzen, sous réserve des droits d'usage (pâturage de troupeaux, ramassage du bois) que pourraient avoir les tribus voisines; les terres désertes et incultes, les biens vacants et sans maître et, d'une façon générale, tous les immeubles que la loi musulmane comprend sous la dénomination de « terres mortes», lesquelles reviennent de droit au Makhzen et ne peuvent, d'après les règles du Chrâa (Législation islamique) être occupées ou vivifiées sans autorisation préalable* » (BOULHOL, 1952). Donc les droits d'usage deviennent déterminés et contrôlés sous la notion de biens du Maghzen (Etat).

Le tableau ci-dessous montre la chronologie de la législation des forêts marocaines à partir de 1914.

Date	Objet
7 juillet 1914	Dahir portant réglementation de la justice civile indigène et de la transmission de la propriété immobilière
3 janvier 1916	Dahir portant règlement spécial sur la délimitation du domaine de l'Etat
10 octobre 1917	Dahir sur la conservation et exploitation des forêts

4 septembre 1918	Arrêt sur la réglementation des conditions de l'exploitation, du colportage, de la vente et de l'exploitation de liège, écorce à tan, glands, charbon, bois, cendre de bois, produits résineux Arrêt relatif aux mesures à prendre en vue de prévenir les incendies de forêts
15 janvier 1921	Arrêt réglant le mode d'exercice du droit de parcours dans les forêts domaniales
4 mars 1925	Dahir sur la protection et délimitation des forêts d'arganier
29 mars 1927	Arrêt relatif à la procédure à suivre en cas de destruction du régime forestier
15 août 1928	Dahir déterminant le régime juridique des nappes alfatières
20 juin 1930	Dahir sur la conservation et exploitation des peuplements d'alfa
11 septembre 1934	Dahir sur la création des parcs nationaux
22 juin 1936	Arrêt des directeurs des eaux et forêts et des affaires politiques relatif à l'application du régime forestier en territoire militaire
12 septembre 1949	Dahir créant le fonds national forestier

Source : (BOULHOL, 1952), complété

Au Maroc les droits d'usage de la forêt ont été fixés par les dahirs de 1912, 1917, les arrêtés du 15 janvier 1921 et 22 juin 1936. Ces droits se résument sur : droits de parcours, ramassage du bois mort, de l'alfa, etc. à condition que ces usages ne soient pas destinés au commerce, etc. Dans le cas contraire, une procédure administrative avec la possibilité d'un recours devant les tribunaux est mise en place.

Le dahir du 20 septembre 1976 relatif à l'organisation de la participation des populations au développement de l'économie forestière a pour principe d'affecter des recettes forestières au budget des communes rurales concernées, sous réserve d'utiliser au moins 20 % de ces recettes pour financer les travaux de reboisement des terrains collectifs, l'amélioration sylvo-pastorale, les plantations fruitières, le captage de sources ou l'aménagement de points d'eau, l'aménagement d'abris collectifs ou de chemins et la création d'espaces verts ou de protection de sites naturels (MINEFI-DREE, 2005).

Le 12 mai 2003 la loi n°11-03 promulguée par le dahir n°1-03-59 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement a mis en place les arrêtés suivants :

Art.23.- Les forêts, qu'elles soient publiques ou privées, sont un bien d'utilité collective. Il est du devoir de l'administration et des particuliers de les conserver et de les exploiter d'une manière qui garantit leur équilibre et le respect des écosystèmes.

Art.24.- Les forêts doivent être exploitées de façon rationnelle et équilibrée. Les plans de gestion et les travaux d'aménagement et d'exploitation intègrent les préoccupations d'environnement pour que leurs utilisations économiques, sociales, culturelles ou récréatives ne portent pas atteinte à l'environnement.

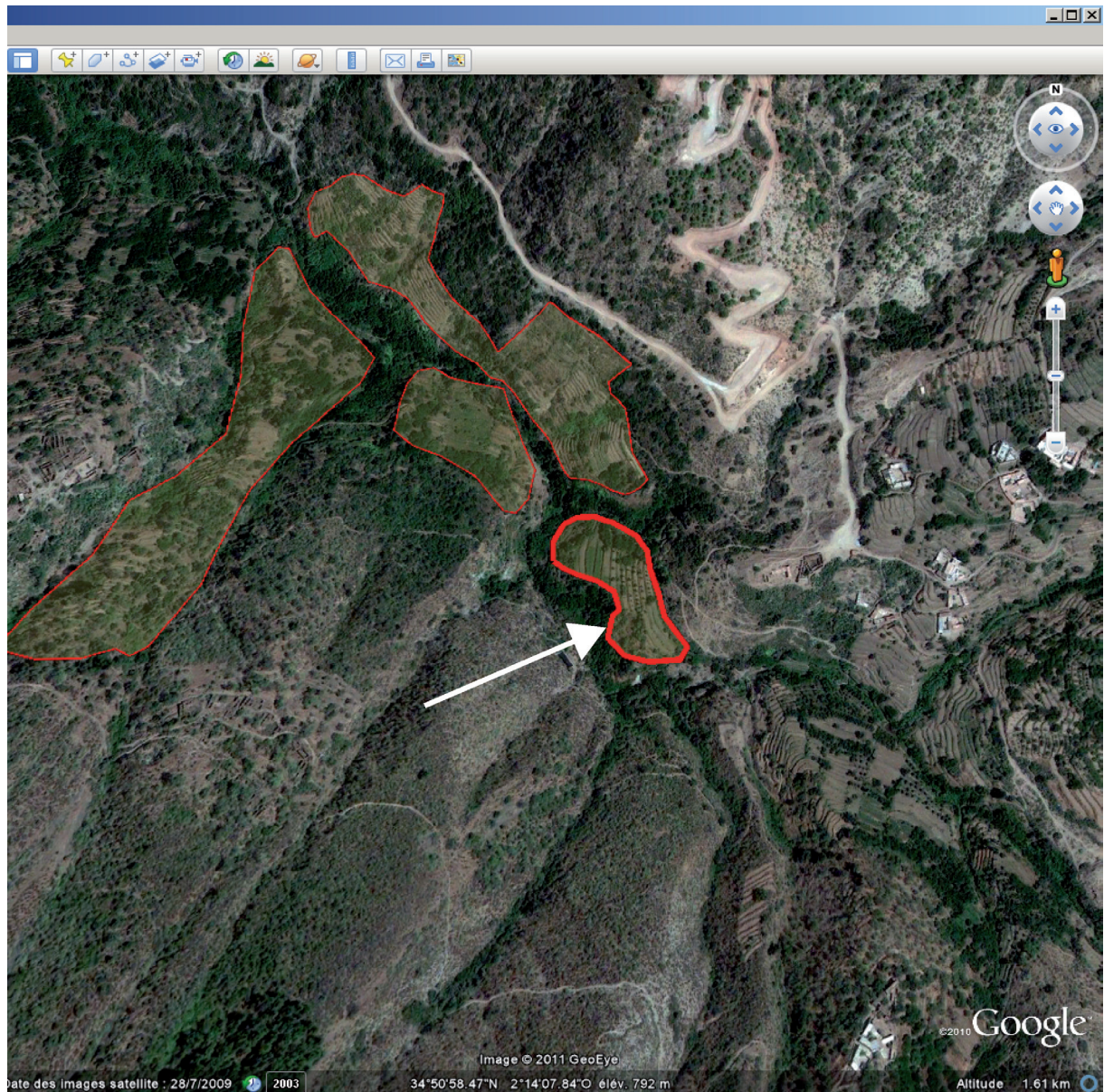
Art.25.- Les forêts doivent être protégées contre toute forme de dégradation, de pollution ou de destruction causées par la surexploitation, le surpâturage, les incendies, les maladies ou l'introduction d'espèces inadaptées.

Art.26.- Il est interdit de procéder à des déboisements, sauf autorisation préalable accordée par l'administration, dans les conditions prévues par les dispositions législatives et réglementaires relatives au domaine forestier (TAZI SADEQ, 2008).

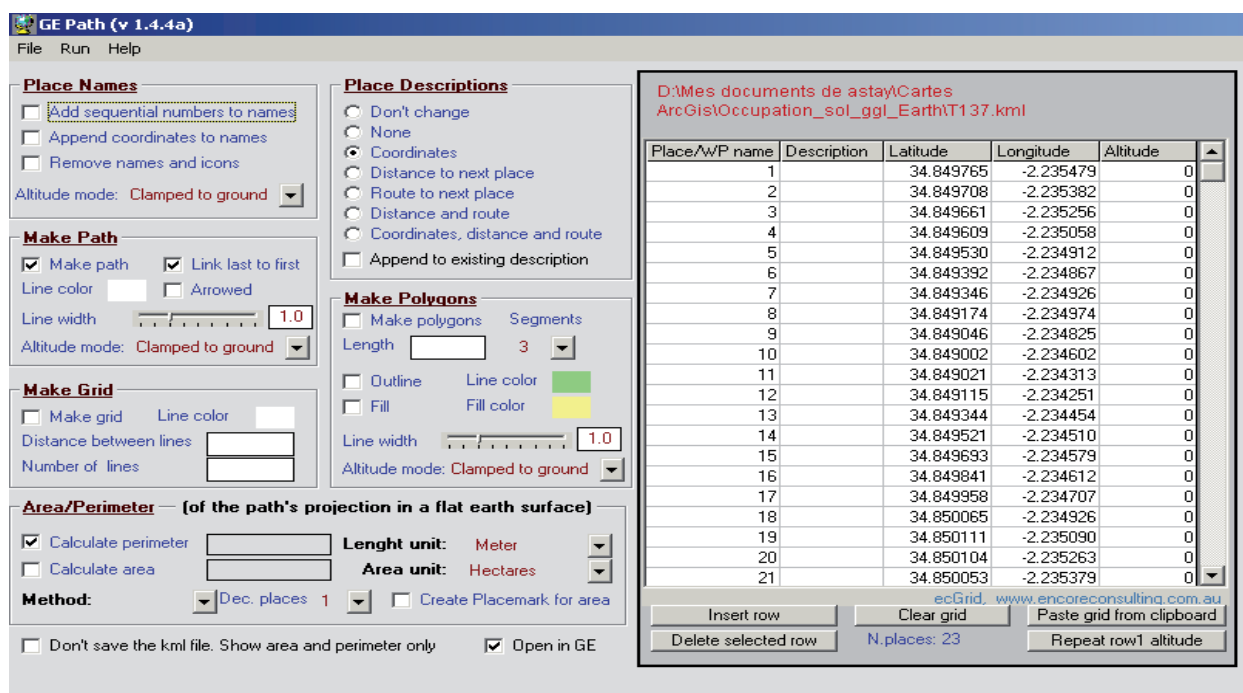
ANNEXE 14 : MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DE TERRASSES AGRICOLES

(cf. chapitre 3)

Etape 1 : Digitalisation des terrasses agricoles à partir de Google Earth



Etape 2 : Exportation des coordonnées (x, y) de chaque terrasse agricole sur GE Path



GE Path (v 1.4.4a)
File Run Help

Place Names

- ☐ Add sequential numbers to names
- ☐ Append coordinates to names
- ☐ Remove names and icons

Altitude mode: **Clamped to ground**

Make Path

- ☒ Make path
- ☒ Link last to first
- Line color:
- ☐ Arrowed
- Line width: 1.0
- Altitude mode: **Clamped to ground**

Make Grid

- ☐ Make grid
- Line color:
- Distance between lines:
- Number of lines:

Area/Perimeter — (of the path's projection in a flat earth surface)

- ☒ Calculate perimeter
- ☐ Calculate area
- Length unit: **Meter**
- Area unit: **Hectares**
- Method: **Dec. places 1**
- ☐ Create Placemark for area

☐ Don't save the kml file. Show area and perimeter only ☒ Open in GE

Place Descriptions

- ☐ Don't change
- ☐ None
- ☒ Coordinates
- ☐ Distance to next place
- ☐ Route to next place
- ☐ Distance and route
- ☐ Coordinates, distance and route
- ☐ Append to existing description

Make Polygons

- ☐ Make polygons
- Length: 3
- ☐ Outline
- Line color:
- ☐ Fill
- Fill color:
- Line width: 1.0
- Altitude mode: **Clamped to ground**

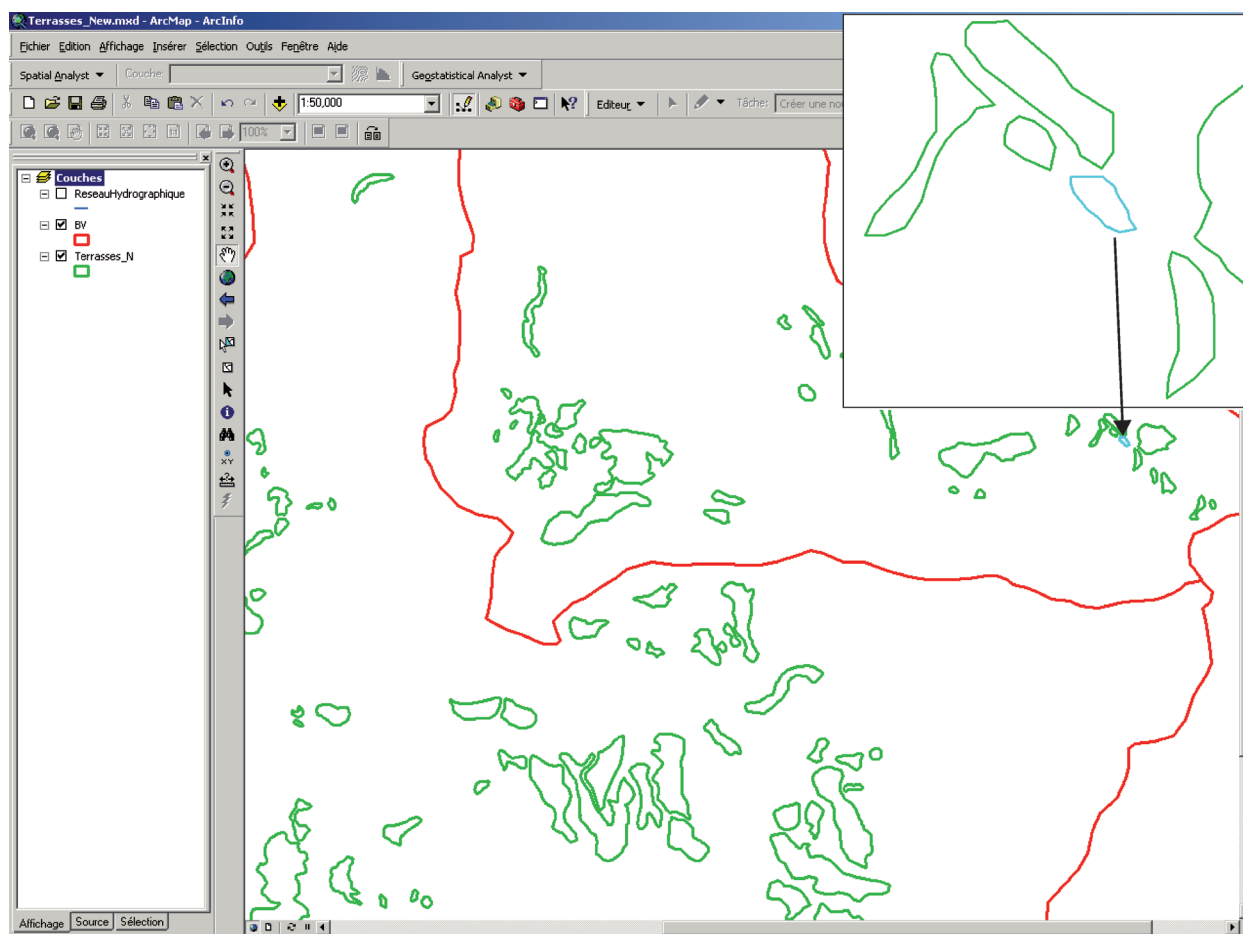
Table Data:

Place/WP name	Description	Latitude	Longitude	Altitude
1		34.849765	-2.235479	0
2		34.849708	-2.235382	0
3		34.849661	-2.235256	0
4		34.849609	-2.235058	0
5		34.849530	-2.234912	0
6		34.849392	-2.234867	0
7		34.849346	-2.234926	0
8		34.849174	-2.234974	0
9		34.849046	-2.234825	0
10		34.849002	-2.234602	0
11		34.849021	-2.234313	0
12		34.849115	-2.234251	0
13		34.849344	-2.234454	0
14		34.849521	-2.234510	0
15		34.849693	-2.234579	0
16		34.849841	-2.234612	0
17		34.849958	-2.234707	0
18		34.850065	-2.234926	0
19		34.850111	-2.235090	0
20		34.850104	-2.235263	0
21		34.850053	-2.235379	0

ecGrid, www.encoreconsulting.com.au

Buttons: Insert row, Clear grid, Paste grid from clipboard, Delete selected row, N.places: 23, Repeat row1 altitude

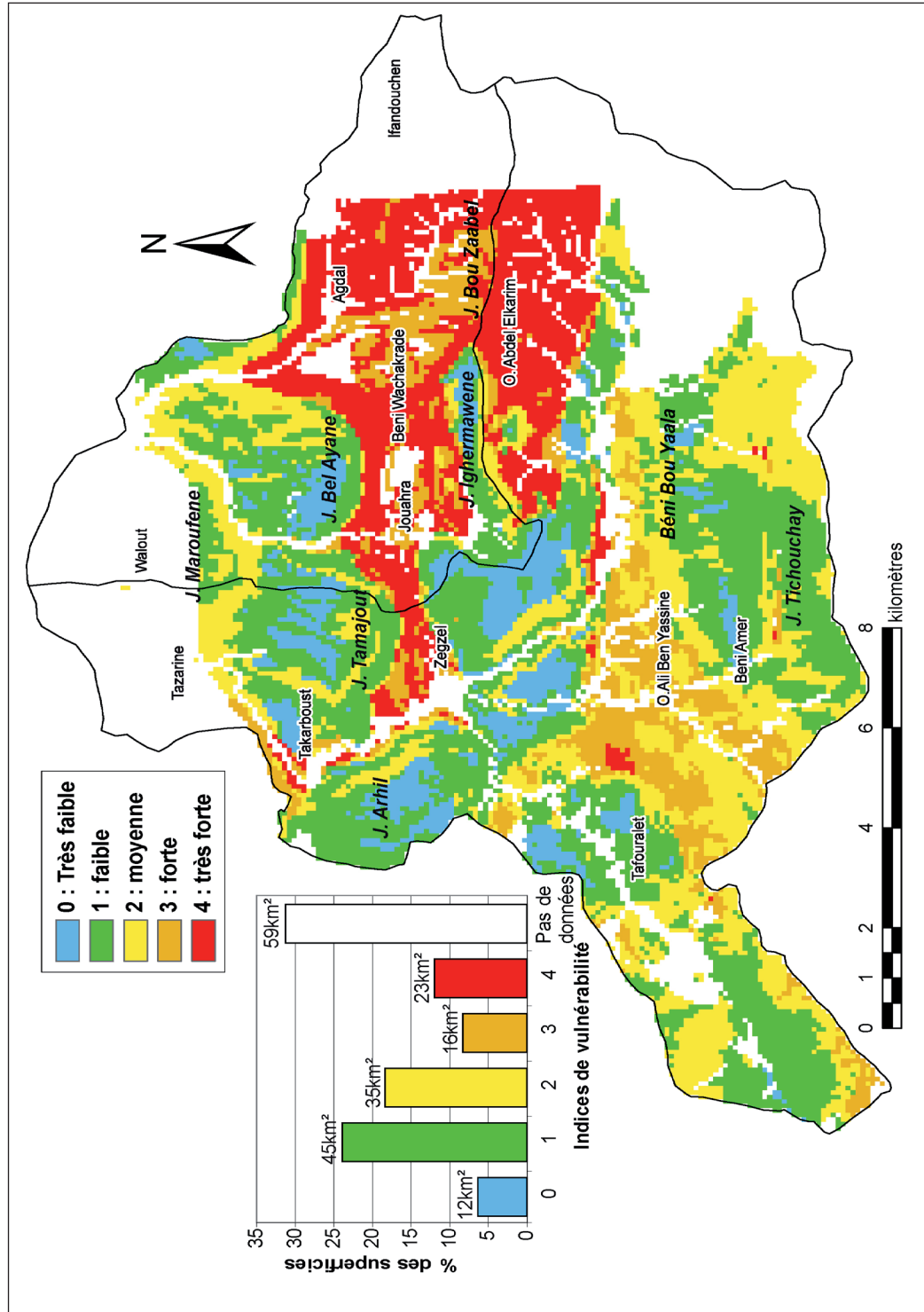
Etape 3 : Importation des polygones « terrasses agricole » sue ArcGis



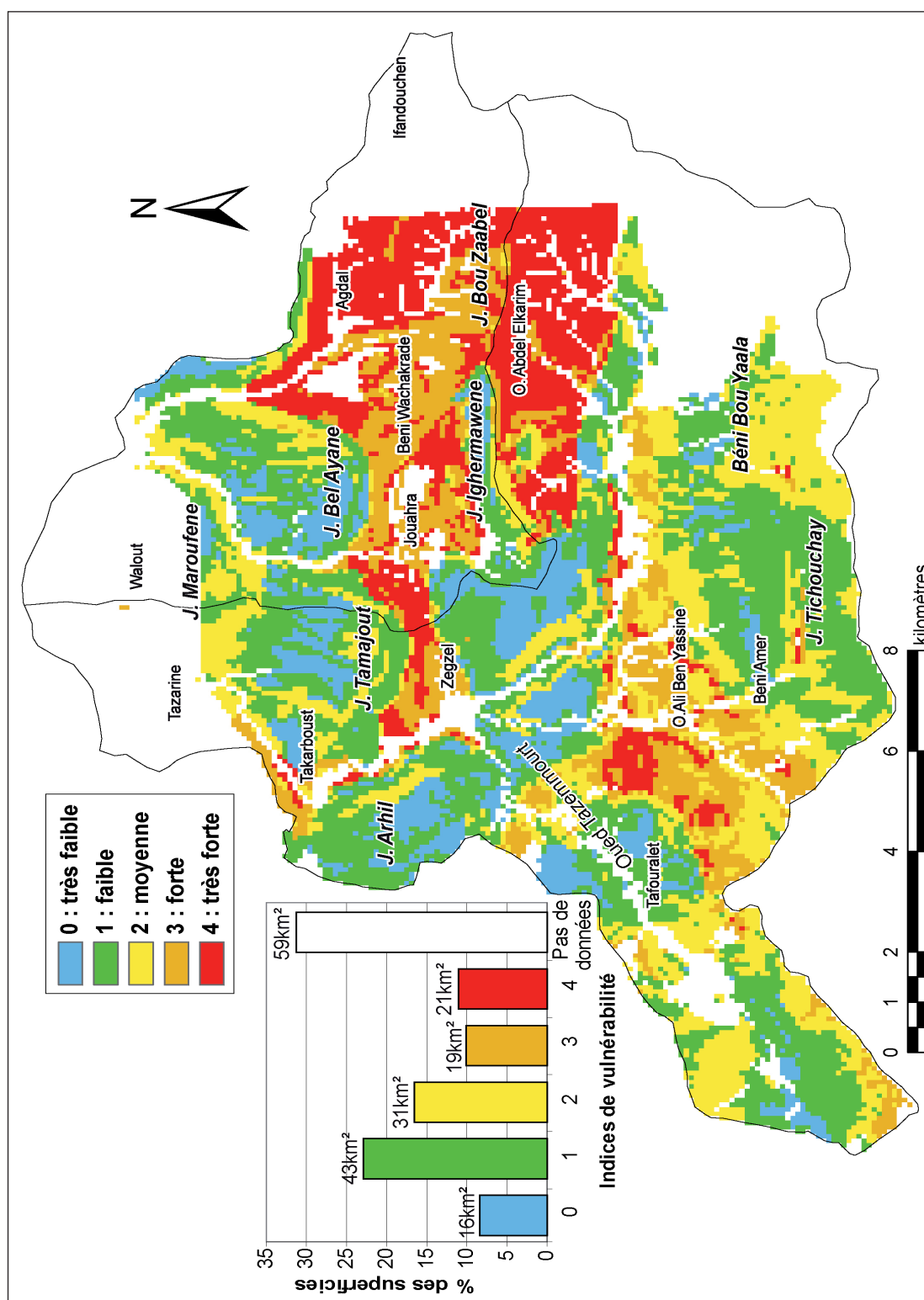
ANNEXE 15 : CARTES DE VULNÉRABILITÉ GLOBALE OBTENUES À PARTIR D'UNE VARIATION DES FACTEURS DE PONDÉRATION (COMBINAISONS A ET B)

(cf. chapitre 4)

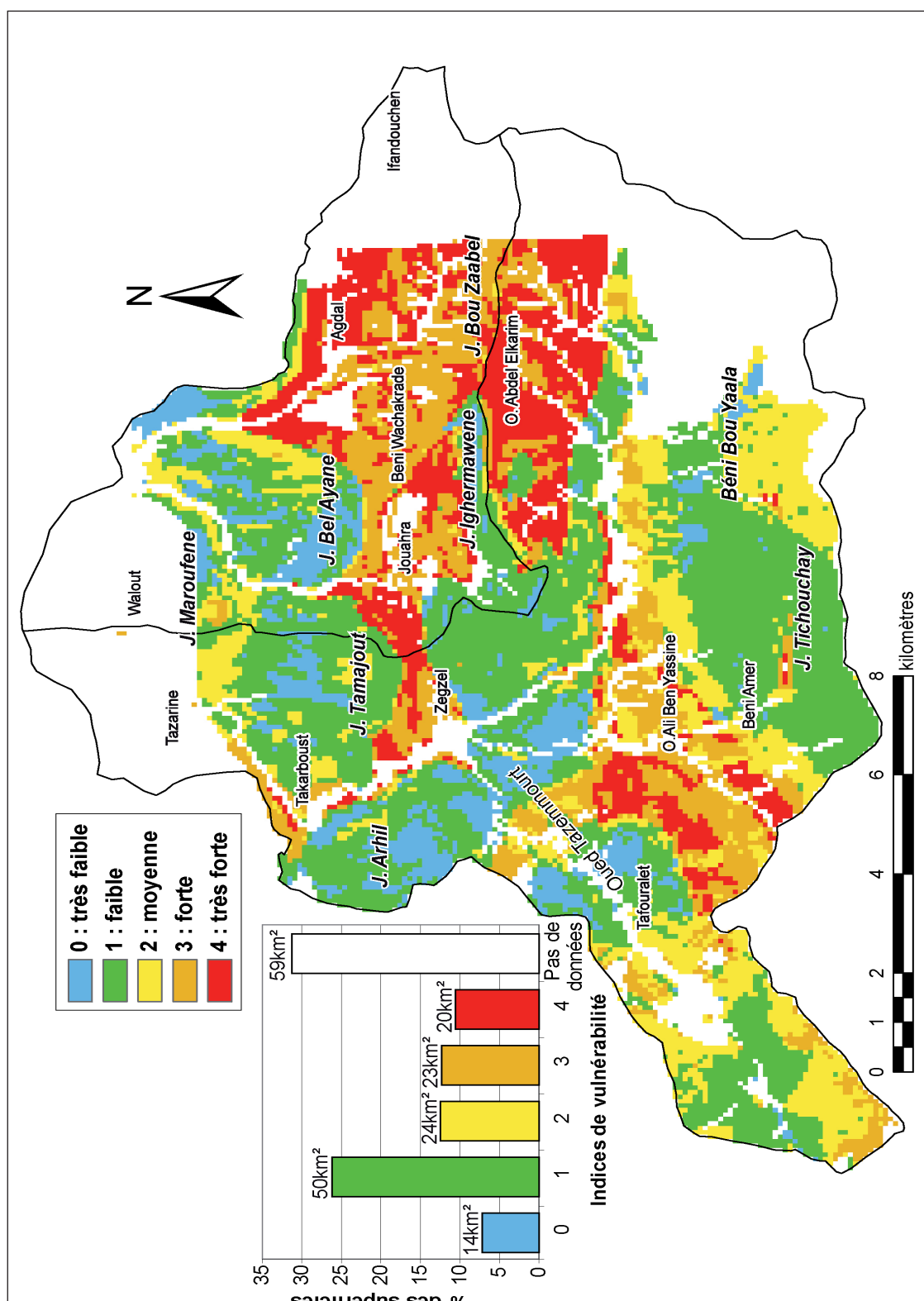
Annexe 15a : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 20%, Infiltration 20%, Lithologie 20% et karstification 20% (Combinaison A)



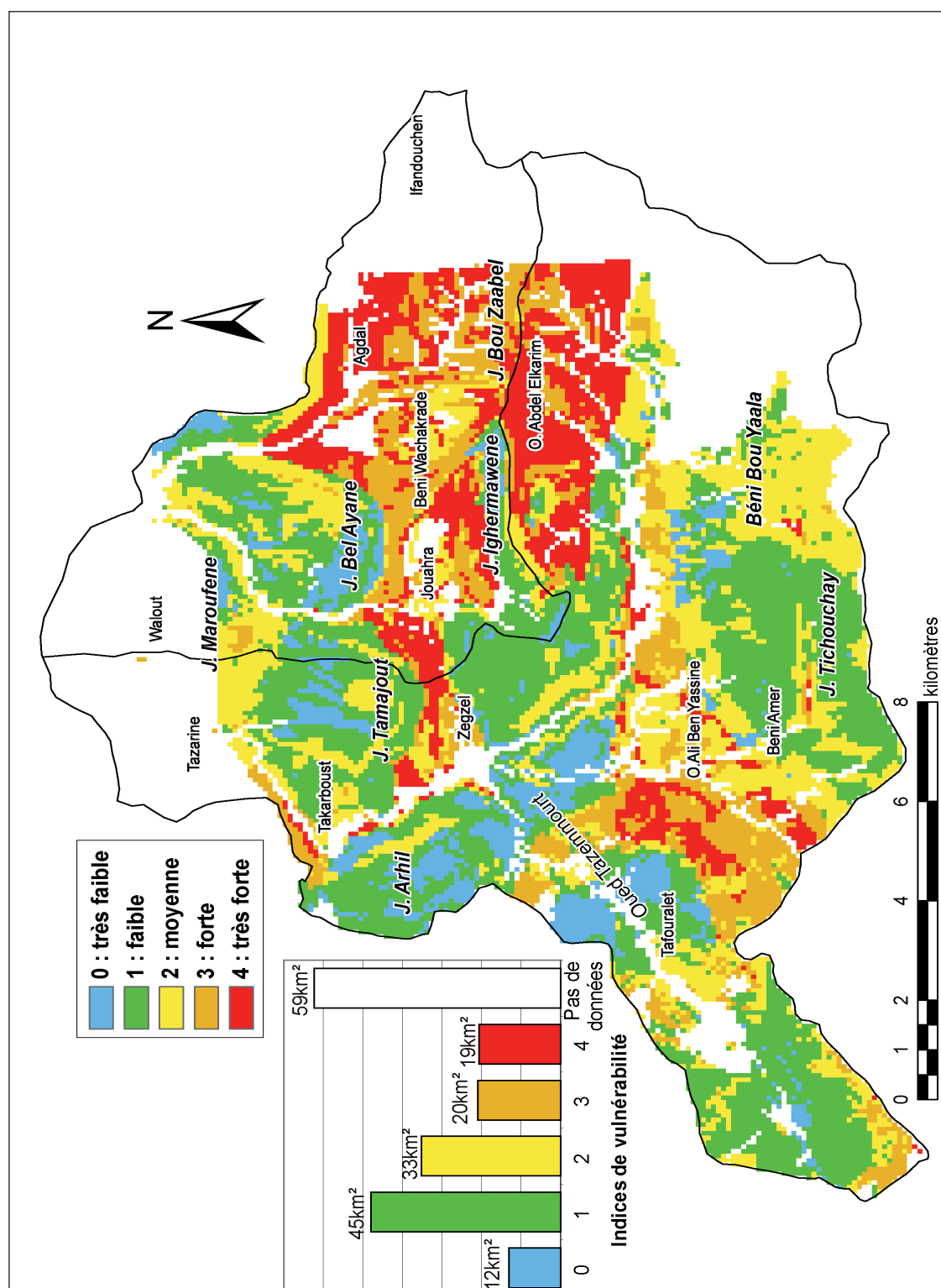
Annexe 15b : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 20%, Infiltration 30%, Lithologie 20% et karstification 10% (Combinaison A).



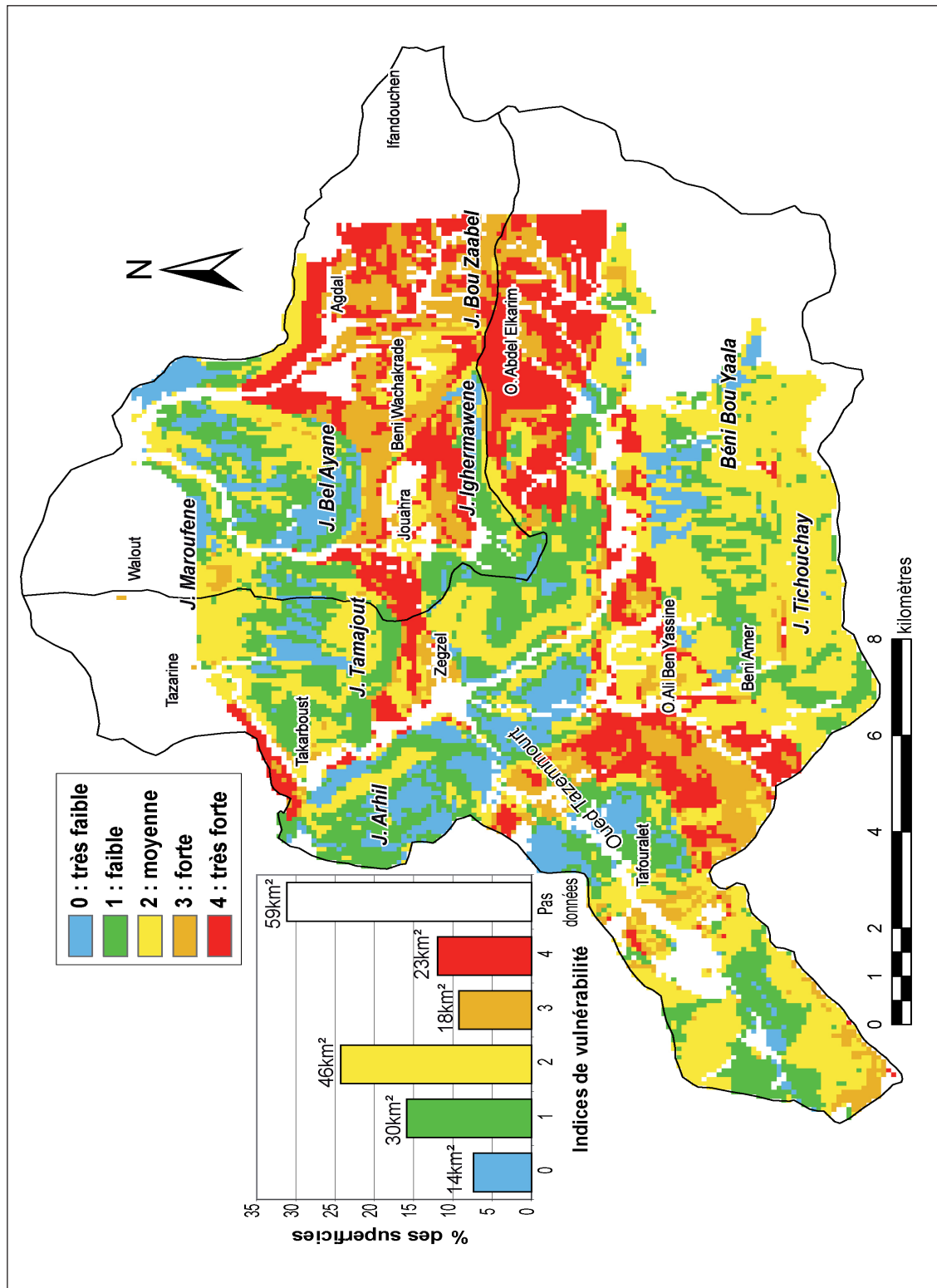
Annexe 15c : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 10%, Lithologie 20% et karstification 10 % (Combinaison A).



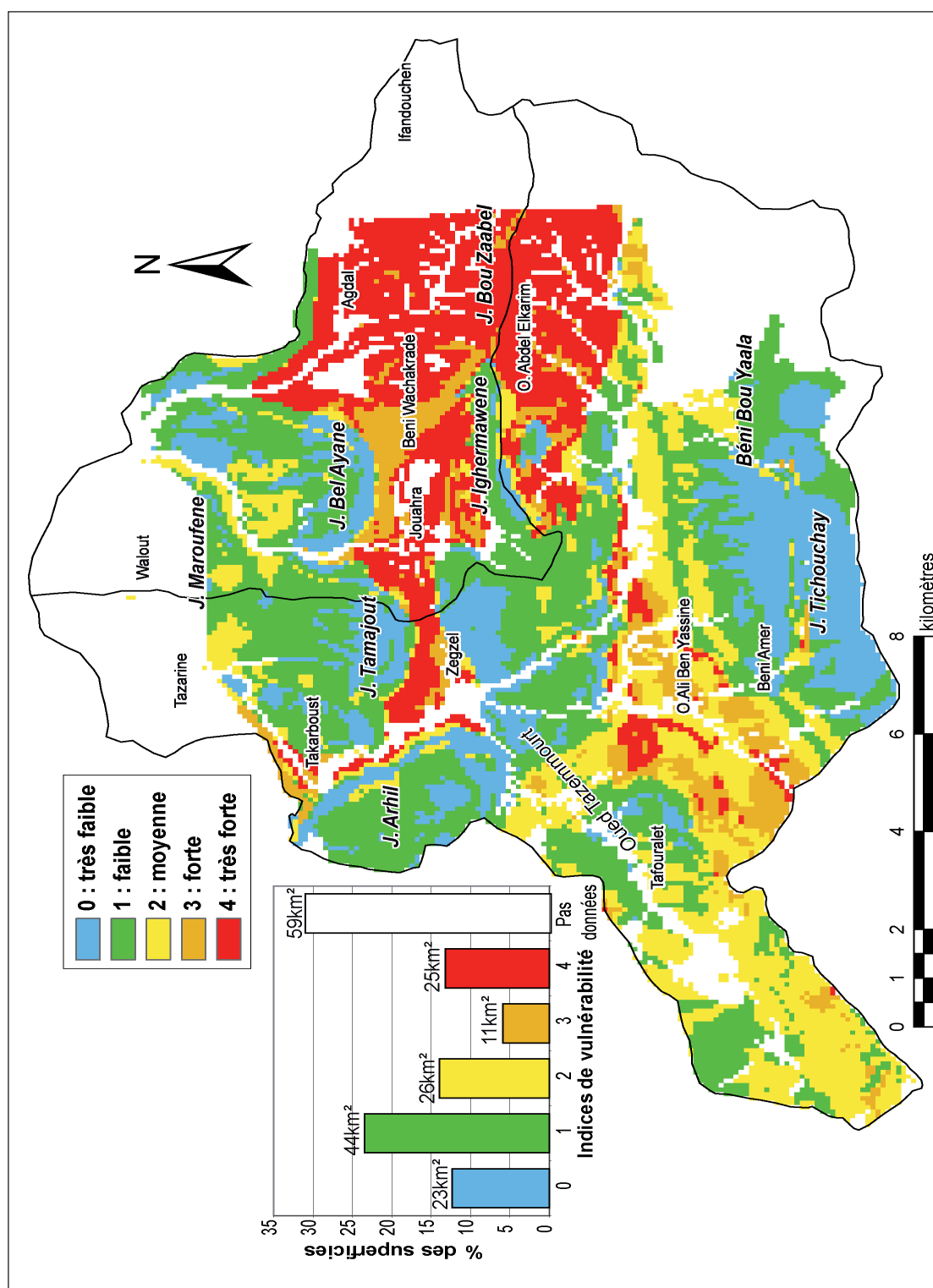
Annexe 15d : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 30%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 40%, Lithologie 10% et karstification 10% (Combinaison A).



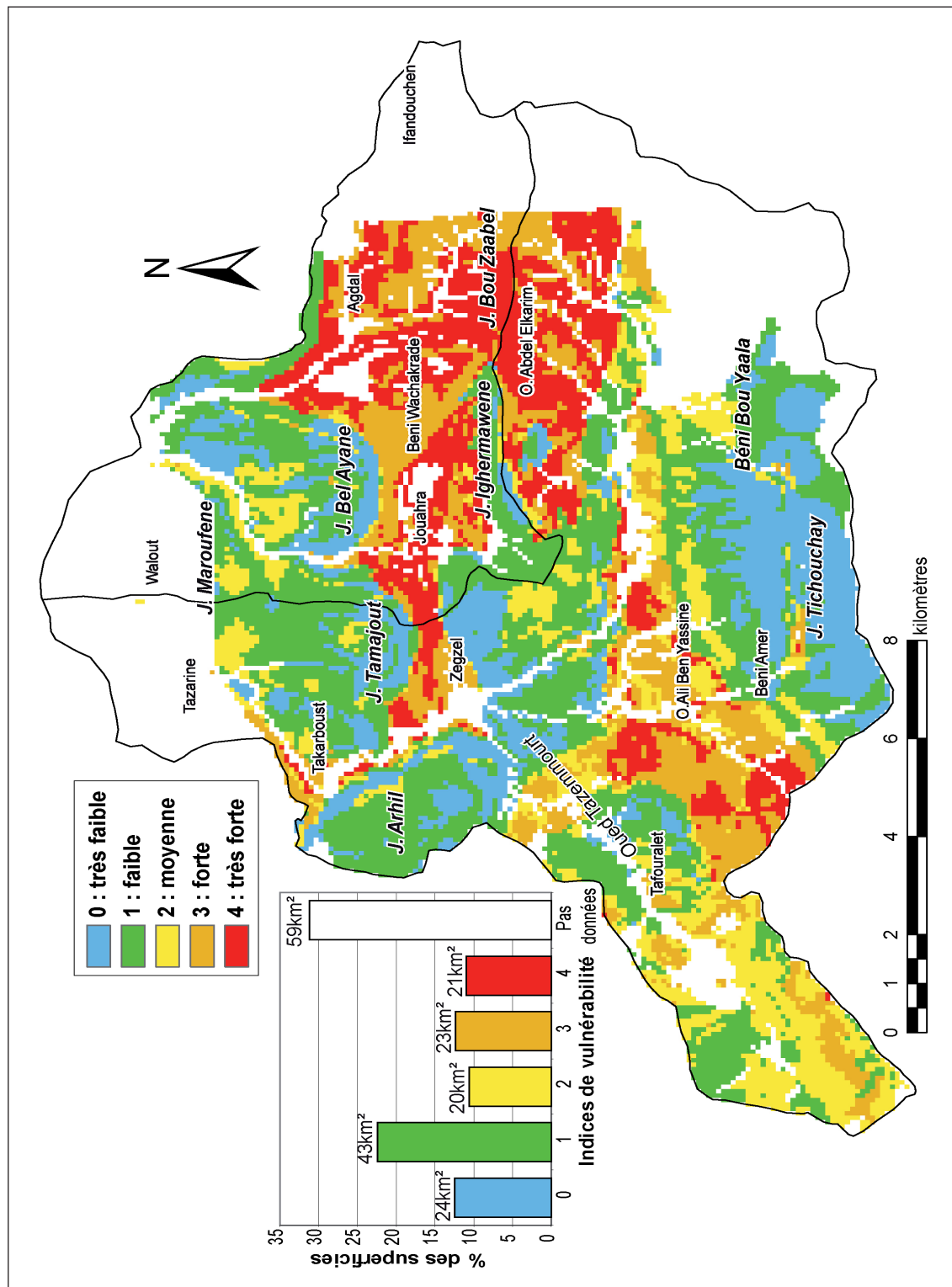
Annexe 15e : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 50%, Lithologie 10% et karstification 10% (Combinaison A).



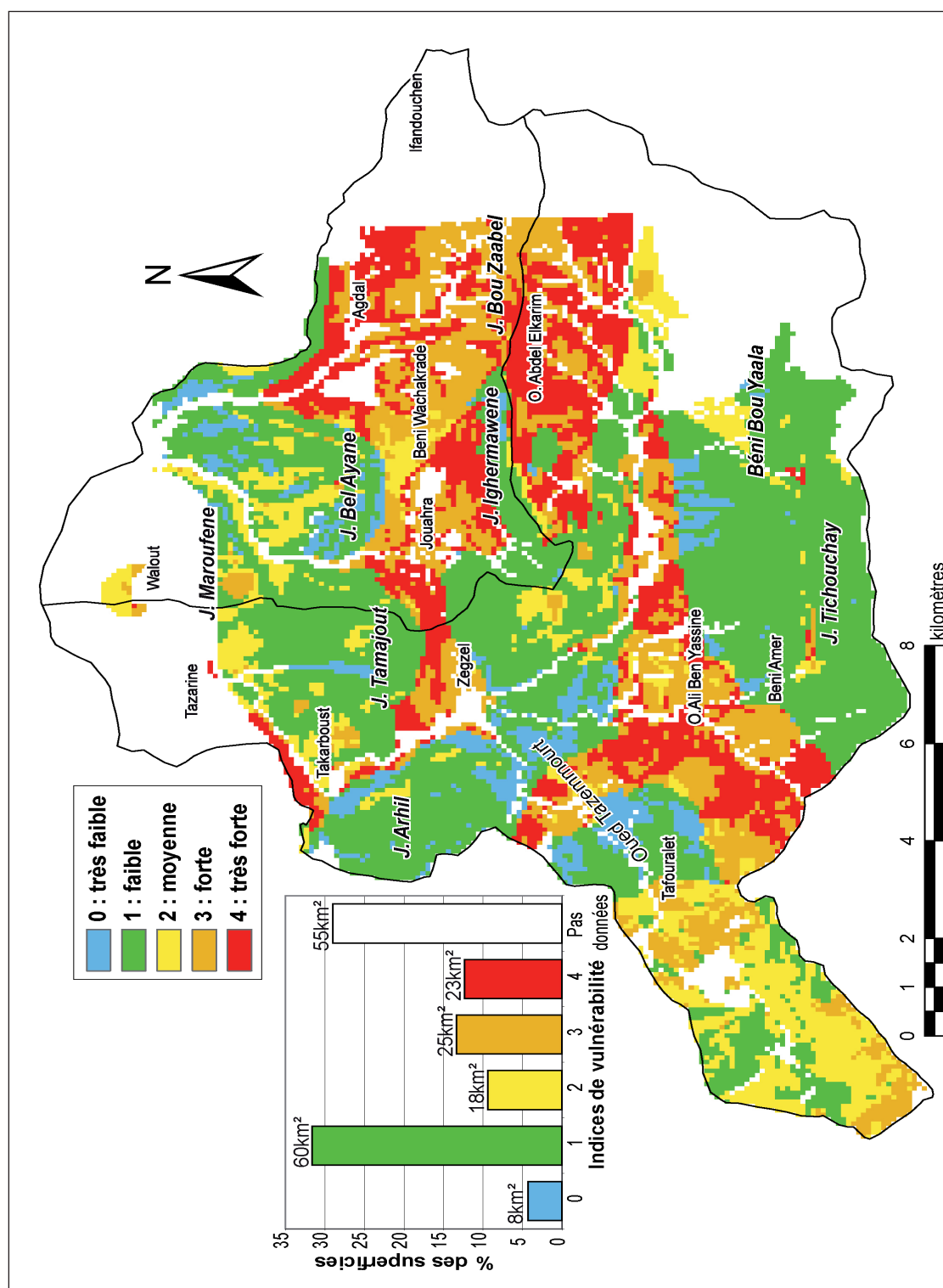
Annexe 15f : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 20%, Infiltration 20%, Lithologie 20% et karstification 20% (Combinaison B).



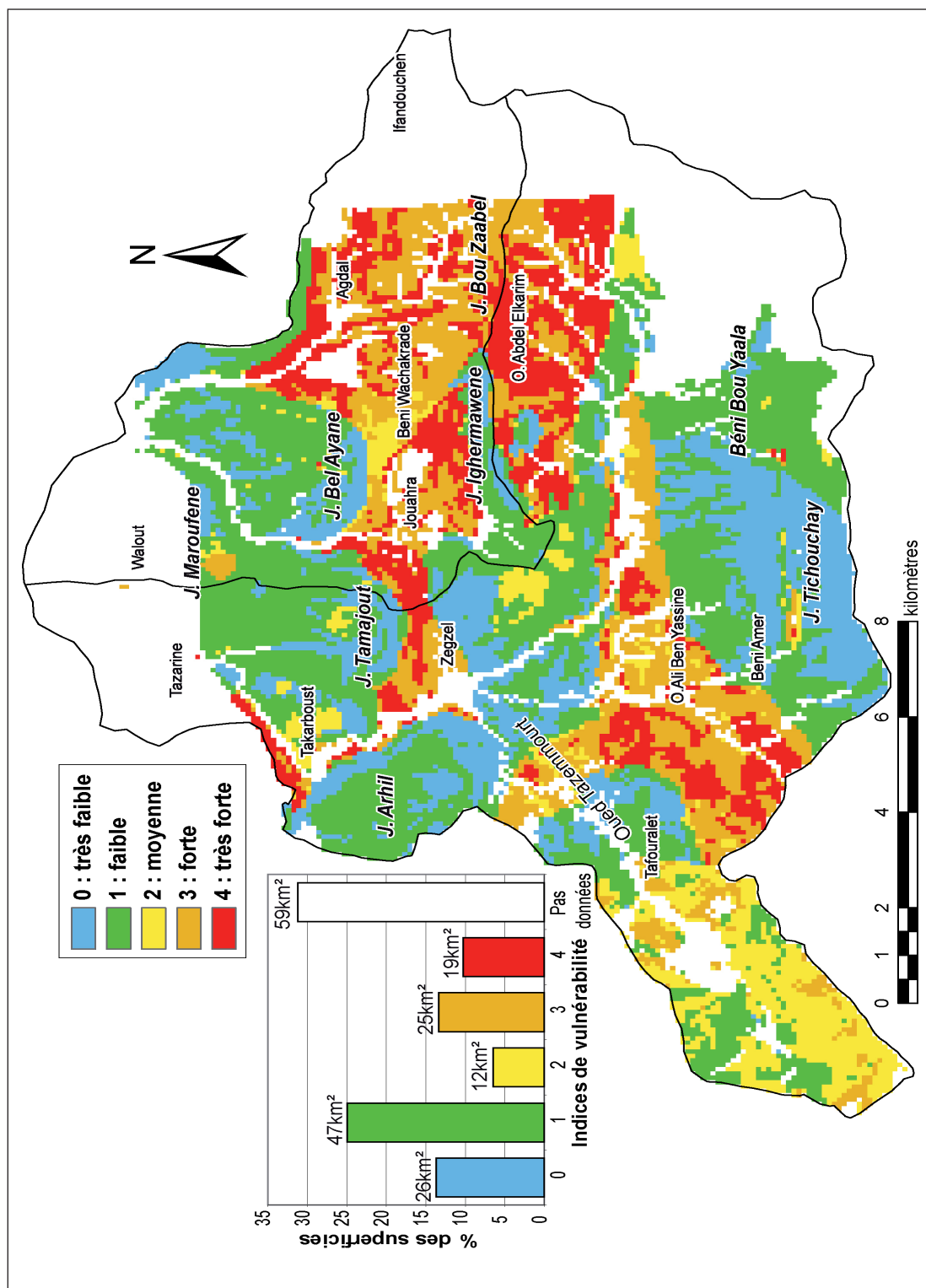
Annexe 15g : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 20%, Infiltration 30%, Lithologie 20% et karstification 10 % (Combinaison B).



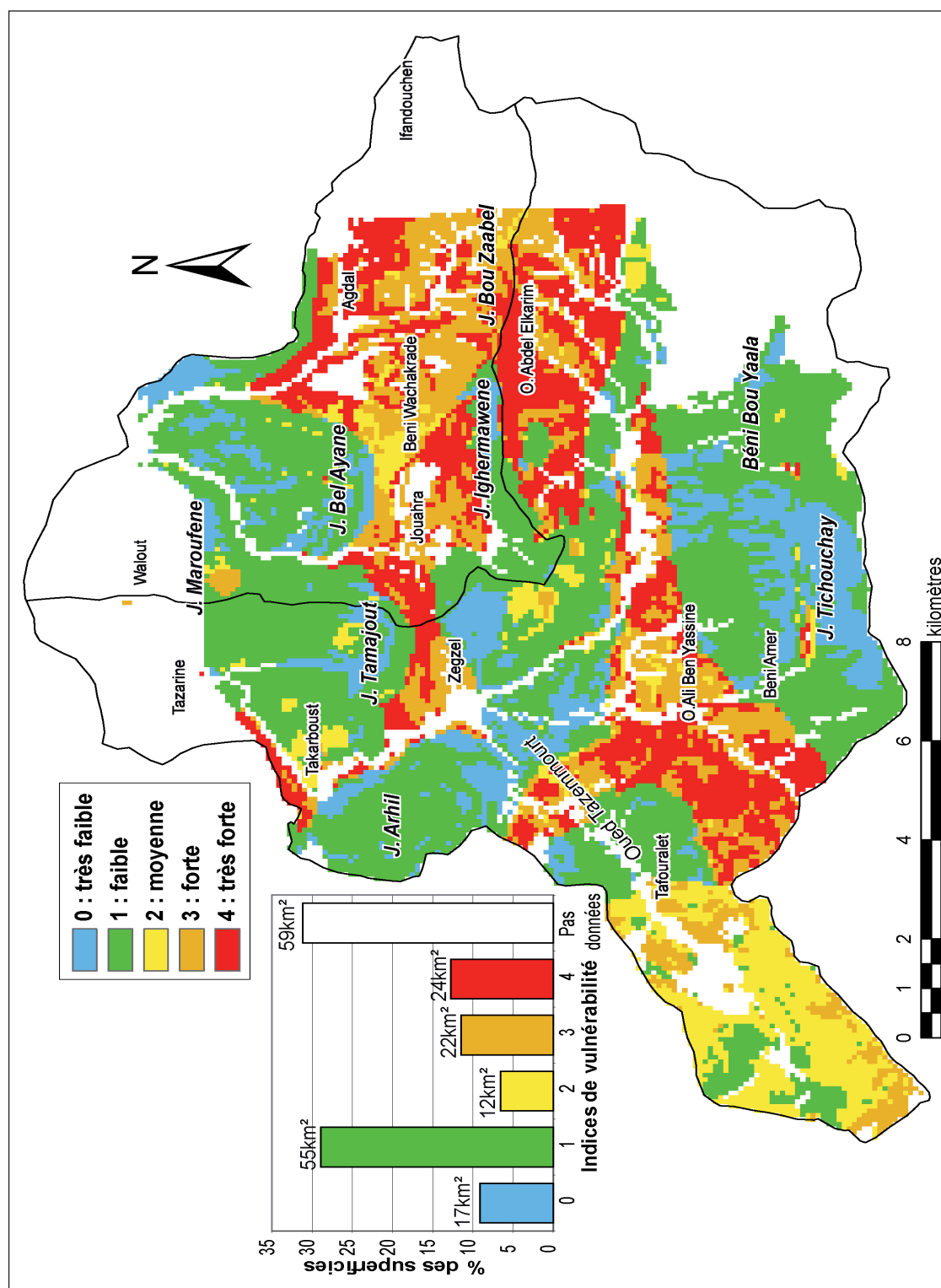
Annexe 15h : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 40%, Lithologie 20% et karstification 10% (Combinaison B).



Annexe 15i : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 20%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 50%, Lithologie 10% et karstification 10% (Combinaison B).



Annexe 15j : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération : Précipitations 10%, couverture Protectrice 10%, Infiltration 60%, Lithologie 10% et karstification 10% (Combinaison B).



ANNEXE 16 : BASES DE DONNÉES CLIMATIQUES

(cf. chapitre 6)

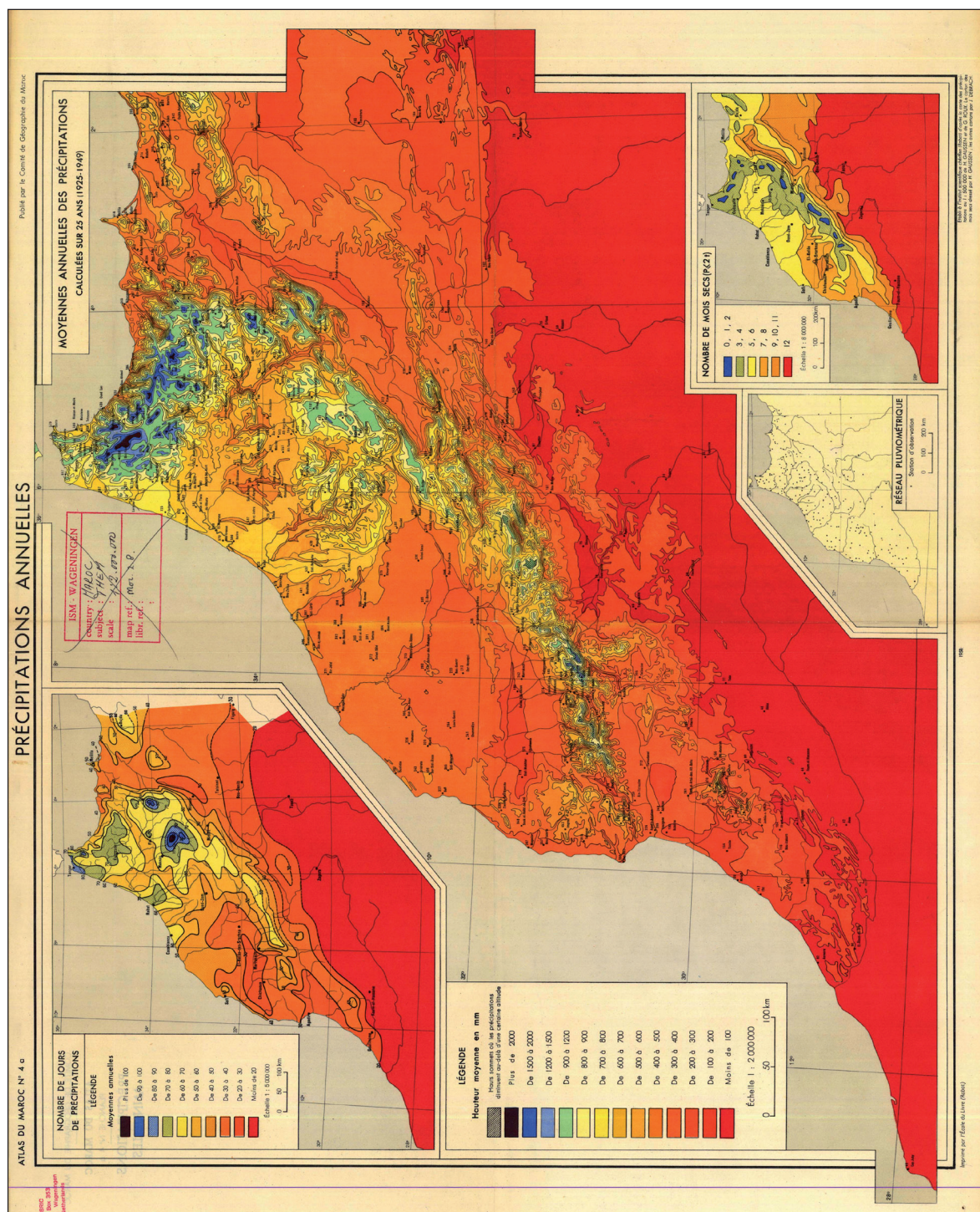
Annexe 16a : Base de données numériques de quelques stations climatiques du Maroc
(2000/2011)

(Les séries de données ne sont pas complètes)

Russia's Weather Server - Weather Archive

Weather stations (name, WMO index)	Coordinates	Time (GMT)	T°	Pressure	Wind	Conditions
Agadir Al Massira #60252	30°20'N 9°24'W	08.08 - 09:00	+21°C	760 mm	W - 2 m/s	☀
Al Hecima #60107	35°11'N 3°51'W	08.08 - 09:00	+31°C	760 mm	N - 2 m/s	☀
Bordj Mella #60191	32°22'N 6°24'W	08.08 - 09:00	+31°C	758 mm	E - 1 m/s	☀
Casablanca #60155	33°34'N 7°40'W	08.08 - 09:00	+25°C	759 mm	N - 3 m/s	☀
Chefchaouen #60106	35°04'N 5°18'W	08.08 - 09:00	+27°C	761 mm	NE - 2 m/s	☀
Erachidia #60210	31°56'N 4°24'W	08.08 - 09:00	+34°C	758 mm	S - 3 m/s	☀
Essaouira #60220	31°31'N 9°47'W	08.08 - 09:00	+19°C	759 mm	W - 1 m/s	☀
Fes Sals #60141	33°56'N 4°59'W	08.08 - 09:00	+31°C	759 mm	E - 2 m/s	☀
Kasba Tadla #60190	32°32'N 6°17'W	08.08 - 09:00	+31°C	757 mm	NE - 2 m/s	☀
Larache #60105	35°11'N 6°08'W	08.08 - 09:00	+24°C	760 mm	calm	☀
Marrakech #60230	31°37'N 8°02'W	08.08 - 09:00	+30°C	758 mm	NW - 2 m/s	☀
Meknes #60150	33°53'N 5°32'W	08.08 - 09:00	+32°C	759 mm	N - 3 m/s	☀
Midekt #60195	32°41'N 4°44'W	08.08 - 09:00	+24°C	765 mm	NW - 1 m/s	☀
Nador #60340	35°09'N 2°55'W	08.08 - 09:00	+33°C	760 mm	NW - 2 m/s	☀
Nouasseur #60156	33°22'N 7°35'W	08.08 - 09:00	+29°C	759 mm	NE - 7 m/s	☀
Quarzazate #60265	30°56'N 6°54'W	08.08 - 09:00	+32°C	759 mm	calm	☀
Oujda #60115	34°47'N 1°56'W	08.08 - 09:00	+34°C	759 mm	NE - 2 m/s	☀
Rabat Sale #60135	34°03'N 6°46'W	08.08 - 09:00	+27°C	760 mm	N - 1 m/s	☀
Safi #60185	32°17'N 9°14'W	08.08 - 09:00	+20°C	760 mm	SW - 5 m/s	☀
Sidi Bel Abbes #60520	35°11'N 2°37'W	08.08 - 09:00	+33°C	759 mm	calm	☀
Sidi Inhi #60060	29°22'N 10°11'W	08.08 - 06:00	+20°C	759 mm	SW - 4 m/s	☀
Tan Tan #60285	28°27'N 11°09'W	08.08 - 09:00	+20°C	761 mm	NW - 3 m/s	☀
Tanger Aerodrome #60101	35°44'N 5°54'W	08.08 - 09:00	+27°C	761 mm	W - 2 m/s	☀
T... #60137	34°18'N 4°01'W	08.08 - 09:00	+29°C	760 mm	calm	☀

source : http://meteo.infospace.ru/wcarch/html/e_sel_stn.shi?adm=14

(GAUSSSEN *et al.*, 1958)

TABLES

FIGURES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Figure 1 : Karsts autour de la méditerranée et en Europe moyenne (d'après NICOD, 2009).....	14
Figure 2 : Réseau de surveillance de la qualité des eaux dans le bassin versant de la Moulouya.....	16
Figure 3 : Qualité globale des eaux du bassin versant de la Moulouya.....	15
Figure 4 : Carte de localisation de la zone d'étude (bassins versants de Zegzel et de Béni Ouaklane).....	17
Figure 5 : Approche systémique de la vulnérabilité.....	19
Figure 6 : Facteurs intervenant dans la vulnérabilité des eaux karstiques.....	25
Figure 7 : Objectifs de la méthode « PPILK » approche spatiale et temporelle de la vulnérabilité des eaux karstiques.....	28

PARTIE I

CHAPITRE I

Figure 1.1 : Affleurements des grandes formations géologiques de la région nord orientale du Maroc avec localisation de la zone d'étude.....	36
Figure 1.2 : Carte géologique des Beni Snassen orientaux	37
Figure 1.3 : Log stratigraphique synthétique montrant les successions des grands ensembles lithostratigraphiques de la chaîne des Beni Snassen.....	38
Figure 1.4 : Colonnes lithostratigraphiques résumant les successions lithologiques et les variations d'épaisseur du Trias de la chaîne des Beni Snassen.....	39
Figure 1.5 : Le piémont d'Ahfir, zone de plateau ondulé à larges accumulations travertineuses..	44
Figure 1.6 : Coupes géologiques sériees N-S montrant les dispositions des principales unités lithostructurales de la chaîne des Beni Sanssen.....	48
Figure 1.7 : Allure morphostructurale de l'anticlinal de Guerbus (Coupe L).....	48
Figure 1.8 : Coupe géologique réalisée le long du transect Berkane-Arhil-Oumenzi (coupe B)..	48
Figure 1.9 : Coupe Draa Sidi Mimoun Oued Sefrou (coupe G).....	49
Figure 1.10 : Synclinal perché de Tafouralet.....	49
Figure 1.11 : Carte géologique synthétique des deux bassins versants étudiés (Zegzel et Béni Ouaklane).....	52
Figure 1.12 : Carte géomorphologique.....	57
Figure 1.13 : Aven de Takerboust.....	59
Figure 1.14 : Carte de localisation des sites travertineux.....	60
Figure 1.15 : Coupe du bassin perché de Tafouralet.....	61
Figure 1.16 : Coupe transversale dans les travertins de la grotte des Pigeons.....	61
Figure 1.17 : Coupe à travers l'oued Tazemourt à Tizi Ou Zemmour dans le bassin perché de	

Trhasrout.....	62
Figure 1.18 : Variation des dépôts selon la topographie dans les versants des gorges de Zegzel.....	66
Figure 1.19 : Coupe schématique des dépôts de pente du jbel Tamejout.....	69
Figure 1.20 : Dépôt de terrasse à Zaouit My ahmed à l'aval du promontoire travertineux d'Arougène.....	71
Figure 1.21 : Fossilisation des alluvions par des colluvions sur les berges de l'oued Zegzel (Tazarhine).....	71
Figure 1.22 : Emboîtement des dépôts de terrasses à l'aval de la grotte des Pigeons (oued Tazemmourt)	71
Figure 1.23 : Les bassins versants des Béni Snassen orientaux.....	75
Figure 1.24 : Relation Altitude et superficie des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	76
Figure 1.25 : Carte hypsométrique des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	77
Figure 1.26 : Carte des pentes en pourcentage des bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	79
Figure 1.27 : Réseau hydrographique des deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	82
Figure 1.28 : Perméabilité de la zone d'étude (les bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane).....	84
Figure 1.29 : Relation coefficient d'hydraulicité interannuelle des précipitations (Tafouralet) et de débit (oued Zegzel) 1970/2000.....	86
Figure 1.30 : Irrégularité temporelle du débit de l'oued. Zegzel (1970/2000).....	87
Figure 1.31 : Coefficient d'hydraulicité, moyenne mensuelle des précipitations (Tafouralet) et débits (oued Zegzel) 1970/2000.....	88
Figure 1.32 : Relation entre les précipitations journalières de la station de Berkane et le débit journalier de l'oued Zegzel (1994/2000).....	89
Figure 1.33 : Répartition des ressources en eaux dans le massif des Béni Snassen.	90
Figure 1.34 : Comparaison de la température des sources étudiées.....	91
Figure 1.35 : Relation entre la température moyenne des sources et l'altitude (2008/2009).....	92
Figure 1.36 : Température des sources karstiques (2008/2009).....	93
Figure 1.37 : Température des sources basaltiques (2008/2009).....	94
Figure 1.38 : Température des sources schisteuses (2008/2009).....	95
Figure 1.39 : Comparaison de la conductivité électrique des eaux des sources suivies.....	96
Figure 1.40 : Comparaison des caractéristiques chimiques des eaux des sources karstiques.....	98
Figure 1.41 : Caractéristiques chimiques des eaux des sources karstiques étudiées.....	99
Figure 1.42 : Comparaison des caractéristiques chimiques des eaux schisteuses et basaltiques.....	101
Figure 1.43 : Diagramme d'équilibre (Courbes de Roques) : Etat de saturation des eaux de sources karstiques	102
Figure 1.44 : Moyenne mensuelle du débit de la source de Zegzel et des précipitations d'Ain Almou (1984/1986).....	106

Figure 1.45 : Corrélation du débit journalier de la source d'Awlout et des précipitations de la station de Berkane (1980/1995).....	107
CHAPITRE 2	
Figure 2.1 : Répartition pluviométrique de la région orientale du Maroc (moyenne interannuelle 1971/1999).....	112
Figure 2.2 : Précipitations moyennes interannuelles (1963/2008).....	113
Figure 2.3 : Pluviométrie saisonnière interannuelle (1963/2008).....	114
Figure 2.4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1963/2008).....	115
Figure 2.5 : Pluviométrie journalière de Berkane, Tafouralet et A. Almou (2000/2009).....	117
Figure 2.6 : Intensité pluviométrique de Berkane, Tafouralet et A. Almou (2000/2009).....	118
Figure 2.7 : Indice standardisé de sécheresse pluviométrique dans les stations de Berkane, Tafouralet et Ain Almou (1963/2009).....	121
Figure 2.8 : Comparaison de la fréquence de l'ISSP de Berkane, Tafouralet et A. Almou (1963/1980 et 1980/1999).....	123
Figure 2.9 : Approche systémique de l'influence du climat sur la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques.....	125
Figure 2.10 : Principales étapes pour l'évaluation de la perméabilité des sols.....	126
Figure 2.11 : Carte des sols des bassins versant Zegzel et Beni Ouaklane.....	127
Figure 2.12 : Sol rouge fersiallitique sur schistes (sol n° 10).....	128
Figure 2.13 : Sol rouge fersiallitique sur schistes altérés (sol n° 9).....	128
Figure 2.14 : Sol brun humifère sur basaltes (sol n° 8).....	129
Figure 2.15 : Sol rouge fersiallitique décapé sur calcaires dolomitiques (sol n° 5).....	130
Figure 2.16 : Sol brun rouge fersiallitique sur calcaires dolomitiques (sol n° 11).....	130
Figure 2.17 : Rendzine brune humifère sur calcaires dolomitiques (sol n° 7).....	131
Figure 2.18 : Rendzine colluviale (sol n° 1).....	131
Figure 2.19 : Rendzine encroûtée humifère (sol n° 2).....	132
Figure 2.20 : Sol rouge fersiallitique sur grès dolomitiques (sol n°6).....	133
Figure 2.21 : sol rouge fersiallitique lessivé sur marno-calcaires (sol n°4).....	134
Figure 2.22 : spatialisation du paramètre épaisseur du sol.....	135
Figure 2.23 : Diagramme triangulaire des horizons de sols prélevés (mai 2010).....	140
Figure 2.24 : Comparaison du Ksat selon les fonctions du pédotransfert de Spaw, Rosetta et Hypres.....	141
Figure 2.25 : Valeurs Ksat selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Rosetta, Hypres).....	142
Figure 2.26 : Comparaison de la réserve utile selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Rosetta, Hypres et Solhydro1).....	143
Figure 2.27 : Valeurs de la réserve utile selon les fonctions pédotransfert (Spaw, Resetta, Hypres, Solhydro 1).....	144

Figure 2.28 : Conductivité hydrique des sols non saturés selon Rosetta.....	146
Figure 2.29 : Couvert végétal Beni Snassen orientaux et Béni Bou Mahyou.....	149
Figure 2.30 : Comparaison des superficies de reboisement et de réussite du reboisement dans le massif des Béni Snassen (années 1950).....	150
Figure 2.31 : Reboisement dans la forêt des Béni Snassen pendant les années 70.....	151
Figure 2.32 : Cas déclarés des délits forestiers dans les Béni Snassen (1986/1994).....	152
Figure 2.33 : Consommation de bois de feu dans les Béni Snassen pour l'année 1995.....	154
Figure 2.34 : Fréquence annuelle des incendies dans le massif des Béni Snassen (1960/2006).....	154
Figure 2.35 : Effectif du bétail dans la région des Béni Snassen (1995)	155
Figure 2.36 : Calendrier fourrager selon les sources alimentaires.....	156
Figure 2.37 : Couvert végétal dans les deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane(1940/1950).....	159
Figure 2.38 : Couvert végétal dans les deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane (1970)....	160
Figure 2.39 : Répartition de la couverture forestière dans la zone d'étude (1997).....	161
Figure 2.40 : Comparaison du couvert végétal (1940/1950, 1970 et 1997).....	161
Figure 2.41 : Evolution de l'organisation territoriale du massif des Béni Snassen et son environnement.....	165
Figure 2.42 : Emigration temporaire annuelle chez les Béni Snassen (1945).....	168
Figure 2.43 : Evolution de la population dans le massif des Béni Snassen et la plaine des Triffa (1936/1960).....	169
Figure 2.44 : Evolution de la population de la plaine des Triffa : Berkane et Ahfir (1936/2004).....	170
Figure 2.45 : Evolution des douars dans la commune de Zegzel (1960/1982).....	173
Figure 2.46 : Ressources hydrauliques dans les Béni Ouachkrades et Jwakra (1999).....	174
Figure 2.47 : Longueur des seguias restaurées et non restaurées dans le périmètre de la commune de Zegzel (1999).....	176
Figure 2.48 : Superficies des périmètres irrigués dans la commune de Zegzel (ha).....	178
Figure 2.49 : Périmètre irrigué de la basse Moulouya.....	178
Figure 2.50 : Structure foncière d'Awlout et Tazaghine (1999).....	181
Figure 2.51 : Densité communale du cheptel (1995).....	182
Figure 2.52 : Evolution démographique de la commune de Zegzel (1982/2004).....	185
Figure 2.53 : Répartition spatiale de la population de la commune de Zegzel (1994/2004).....	186
Figure 2.54 : Répartition de la population dans les bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane (1994/2004).....	188

PARTIE II

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : Etapes de la construction du SIG.....	199
Figure 3.2 : Sous critères composant du paramètre « précipitation ».....	201
Figure 3.3 : Création de polygone de Theissen à partir d'une interpolation du voisin naturel....	202
Figure 3.4 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du paramètre « quantité des précipitations » région nord est du Maroc (2001/2004).....	204
Figure 3.5 : Répartition spatiale des classes de vulnérabilité en fonction de l'intensité pluviométrique région nord est du Maroc (2001/2004).....	206
Figure 3.6 : Carte de vulnérabilité du paramètre « Précipitation » en fonction de croisement des sous critères « quantité des précipitations » et « Intensité pluviométrique » région nord est du Maroc (2001/2004)	208
Figure 3.7 : Influence des sous critères du paramètre « couverture Protectrice » vis-à-vis de l'infiltration.....	209
Figure 3.8 : Vulnérabilité à l'infiltration en fonction de la perméabilité des sols.....	211
Figure 3.9 : Vulnérabilité des sols par rapport à l'épaisseur de la couverture protectrice.....	212
Figure 3.10 : Facteurs de pondérations des couches d'informations (perméabilité et épaisseur) dans l'évaluation du paramètre P « couverture Protectrice »	213
Figure 3.11 : Résultats d'évaluation et de croisement de la couverture protectrice.....	214
Figure 3.12 : Caractérisation des sous critères composant du paramètre infiltration	216
Figure 3.13 : Délimitation du bassin d'alimentation d'une perte karstique. Cas de la perte de l'oued Tazmmourt.....	217
Figure 3.14 : Géomorphologie associée aux indices de vulnérabilité.....	218
Figure 3.15 : Relation pente, vulnérabilité en fonction de l'infiltration.....	219
Figure 3.16 : Classes de pentes associées aux indices de vulnérabilité.....	221
Figure 3.17 : Carte d'occupation du sol associée aux indices de vulnérabilité.....	224
Figure 3.18 : Superposition des paramètres d'évaluation du critère « I ».....	225
Figure 3.19 : Indice de vulnérabilité du paramètre « Infiltration », selon le facteur de pondération de sous critère « formes géomorphologiques », « pente » et « occupation du sol ».....	226
Figure 3.20 : Echelle stratigraphique simplifiée associée aux indexations de la vulnérabilité vis-à-vis de la lithologie.....	228
Figure 3.21 : Rosaces de fréquences des directions de fracturation dans le massif des Béni Snassen.....	229
Figure 3.22 : Incidences du contexte litho-structural sur la puissance du gradient hydrauliques.....	230
Figure 3.23 : Carte de la vulnérabilité en fonction de la lithologie.....	231
Figure 3.24 : Vulnérabilité à l'infiltration en fonction de la karstification souterraine.....	233

CHAPITRE 4

Figure 4.1 : Sept exemples de tests de facteurs de pondération attribués à chaque paramètre intervenant dans la vulnérabilité en fonction de la recharge des aquifères karstiques.....	239
Figure 4.2 : Poids de facteurs de pondération et variation des surfaces de vulnérabilité selon les combinaisons tests proposées.....	242
Figure 4.3 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération	243
Figure 4.4 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison A obtenue à partir des facteurs de pondération	244
Figure 4.5 : Poids de facteurs de pondération et variation des surfaces de vulnérabilité selon les combinaisons tests proposées.....	247
Figure 4.6 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison B obtenue à partir des facteurs de pondération.....	248
Figure 4.7 : Carte de vulnérabilité globale selon la combinaison B obtenue à partir des facteurs de pondération.....	249
Figure 4.8 : Résultats synthétiques.....	251

CHAPITRE 5

Figure 5.1 : Illustration schématique des quatre étages de la grotte du Chameau plus ou moins génétiques	258
Figure 5.2 : Plan de la grotte du Chameau.....	259
Figure 5.3 : Remplissage d'origine fluviale de la galerie ouest de l'étage inférieur de la grotte du chameau.....	259
Figure 5.4 : Coupe synthétique du karst barré de la grotte du Chameau.....	261
Figure 5.5 : Coupe de la galerie intermédiaire (coupe AA') de la grotte du Chameau	262
Figure 5.6 : Coupe de la galerie intermédiaire (coupe BB') de la grotte du Chameau.....	263
Figure 5.7 : Coupe de la galerie ouest de l'étage inférieur (coupe CC') de la grotte du Chameau.....	265
Figure 5.8 : Coupe dans la galerie sud de l'étage inférieur (coupe DD') de la grotte du Chameau....	266
Figure 5.9 : Coupe dans la partie amont de la rivière dans la galerie sud de l'étage inférieure (coupe EE') de la grotte du Chameau.....	267
Figure 5.10 : synthèse génétique des formes et formations de la grotte de Chameau. Il s'agit d'une galerie idéalisée représentation de l'ensemble des conduits de la galerie.....	269
Figure 5.11 : Evolution de la grotte du Chameau à partir des indices morphologiques relevés grâce à la cartographie souterraine.....	271

CHAPITRE 6

Figure 6.1 : Etapes de la réalisation d'une approche diachronique pour l'appréciation de l'évolution temporelle de la vulnérabilité des eaux karstique.....	276
--	-----

Figure 6.2 : L'évolution des dynamiques spatiales des Béni Snassen de la période précoloniale jusqu'à la période actuelle.....	279
Figure 6.3 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « quantité des précipitations » de la région nord est du Maroc (1925/1949).....	280
Figure 6.4 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1925/1949).....	281
Figure 6.5 : Carte de vulnérabilité du paramètre « précipitation » en fonction du croisement des sous critères « quantité des précipitation » et « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1925/1949).....	282
Figure 6.6 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du critère « quantité des précipitations » de la région nord est du Maroc (1970/1980).....	283
Figure 6.7 : Carte de vulnérabilité du paramètre « Précipitation » en fonction du croisement des sous critères « quantité des précipitation » et « Intensité pluviométrique » de la région nord est du Maroc (1970/1980).....	284
Figure 6.8 : Comparaison temporelle (années 1940, 1970 et 2000) de la répartition spatiale du paramètre « Précipitations ».....	385
Figure 6.9 : Evaluation du critère « occupation du sol » des années 1940.....	286
Figure 6.10 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1940.....	287
Figure 6.11 : Evaluation du critère « occupation du sol » de la période 1970.....	288
Figure 6.12 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1970.....	289
Figure 6.13 : Evaluation du critère « occupation du sol » de la période 1997.....	290
Figure 6.14 : Répartition spatiale du paramètre « Infiltration » des années 1997.....	291
Figure 6.15 : Répartition spatiale de la vulnérabilité en fonction du sous critère « occupation du sol » (années 1940, 1970 et 1997) dans le deux bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	292
Figure 6.16 : Comparaison temporelle (années 1940, 1970 et 1997) de la répartition spatiale du paramètre « Infiltration ».....	293
Figure 6.17 : Diagramme des superficies des indices de vulnérabilité pour les décennies 1940, 1970 et 2000 (exprimé en pourcentage des surfaces).....	293
Figure 6.18 : Evolution temporelle de la vulnérabilité et modification des facteurs protecteurs des paramètres variables (précipitations et occupation du sol).....	294
Figure 6.19 : Exemple de l'évolution temporelle de la vulnérabilité pour les deux zones les plus anthropisées (Tafouralet et Zegzel) pendant les années 1940, 1970 et 2000.....	296
Figure 6.20 : Evolution temporelle de la vulnérabilité en fonction de l'irrégularité du paramètre « Précipitations » (2001/2002 et 2003/2004).....	398
CONCLUSION GÉNÉRALE	
Figure 8 : Les six étapes de la mise en place d'une étude d'aide à la décision ici en contexte karstique semi-aride.....	307
Figure 9 : Les acteurs impliqués dans la gouvernance et la territorialisation du massif des Béni Snassen.	311

TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE I

CHAPITRE I

Tableau 1.1 : Composition pétrographique des sables de l'oued Ferrouj, Moulay Idris Aril Nyaàla et de la grotte Chameau.....	72
Tableau 1.2 : Classes de pentes des bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	78
Tableau 1.3 : Caractéristiques physiques des bassins versants étudiés.....	83
Tableau 1.4 : Densité du drainage des bassins versants Zegzel et Béni Ouaklane.....	85
Tableau 1.5 : Turbidité de certaines sources suivies.....	104

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 : Classification de l'indice standardisé de sécheresse pluviométrique.....	120
Tableau 2.2 : Séquences sèches dépassant l'année dans les stations de Berkane, Tafouralet et Ain. Almou.	122
Tableau 2.3 : Mesures de perméabilités obtenues par la méthode « Muntz »	137
Tableau 2.4 : Catégories de la perméabilité des sols.....	141
Tableau 2.5 : Répartition du couvert végétal dans les Beni Snassen orientaux et les Béni Bou Mahyou (1997).....	157
Tableau 2.6 : Structure foncière de la zone «Petite et Moyenne Hydraulique»	180
Tableau 2.7 : Pourcentage de provenance de touristes (printemps 2002).....	183

PARTIE II

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 : Classes d'évaluation du paramètre « Quantité des précipitations ».....	203
Tableau 3.2 : Classes d'évaluation du paramètre « Intensité pluviométrique »	205
Tableau 3.3 : Evaluation du critère perméabilité de la couverture protectrice.....	210
Tableau 3.4 : Evaluation du critère épaisseur de la couverture protectrice.....	212
Tableau 3.5 : Evaluation du critère « géomorphologie karstique ».....	217
Tableau 3.6 : Evaluation du critère pente.....	220
Tableau 3.7 : Répartition de la densité du couvert forestier dans les deux bassins versants (Zegzel et Béni Ouaklane).....	222
Tableau 3.8 : Evaluation du critère « occupation du sol ».....	223
Tableau 3.9 : Evaluation du critère karstification souterraine.....	232

CHAPITRE 4

Tableau 4.1 : Reclassification des catégories de vulnérabilité globale à l'aide d'un SIG	241
---	-----

CHAPITRE 6

Tableau 6.1 : Les quatre périodes du changement socioéconomique et territorial dans les Béni Snassen (1907-2010).....277

Tableau 6.2 : Intensité pluviométrique de la région nord est du Maroc (1970/1980).....283

Tableau 6.3 : Précipitations et intensité pluviométrique de la région nord est du Maroc (2001/2004).....296

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tableau 1 : Superficie d'intervention par rapport à la superficie totale de la commune et par rapport à la zone d'étude (exprimé en pourcentage des surfaces).....310

LISTE DES PHOTOS

PARTIE I

CHAPITRE 1

Photo 1.1 : Vue panoramique montrant les différents faciès composant le Trias de la chaîne des Béni Snassen (jbel Tazdeit).....	40
Photo 1.2 : Vue panoramique montrant la disposition des assises dolomitiques du Lias inférieur au niveau de Jbel Tamajout	41
Photo 1.3 : Bancs calcaires du Carixien (jbel Arhil Acham).	41
Photo 1.4 : Vue panoramique montrant les alternances marno-calcaires du Toarcien près de Trasrout.	42
Photo 1.5 : Quelques illustrations des lapiés de ruissellement.....	55
Photo 1.6 : Illustrations des lapiés de crypto-corrosion (Arhil Nyaala).....	55
Photo 1.7 : Champs de pierres (Ouled Ouliyou).	58
Photo 1.8 : Doline végétalisée avec un caractère émoussé des calcaires bordant la dépression (Arhil Nyaala).....	59
Photo 1.9 : Le bassin perché de Tafouralet.....	61
Photo 1.10 : Travertins de la grotte des Pigeons.....	62
Photo 1.11 : Le bassin perché de Trhasrout.....	63
Photo 1.12 : Les travertins du Trhasrout.	63
Photo 1.13 : Le bassin perché d'Arougène.....	64
Photo 1.14 : Détail des travertins d'Arougène.....	65
Photo 1.15 : le bassin perché Jwahra.	65
Photo 1.16 : Dépôts de blocs métriques associés à des blocs décimétriques (versant est du jbel Azou Guidren).	68
Photo 1.17 : Cône d'éboulis dans le versant sud de jbel Tamejout.....	70
Photo 1.18 : Illustration des phénomènes de ravinement et d'érosion des sols (Béni Snassen orientaux 2008/2009).....	74
Photo 1.19 : Turbidimètre infrarouge « Merck »	103
Photo 1.20 : Sources «Ain Awlout» et «source de la grotte du Chameau» en crue et en étiage.....	105

CHAPITRE 2

Photo 2.1 : Quelques illustrations de l'assèchement chronique de la source de la grotte du Chameau.	124
Photo 2.2 : Mesure de l'épaisseur du sol à l'aide d'une tarière (printemps 2009).....	136
Photo 2.3 : Le double infiltromètre de <i>Muntz</i>	137
Photo 2.4 : Quelques exemples de la destruction de la couverture végétale.....	153

Photo 2.5 : Rôle du reboisement dans la répartition forestière.	158
Photo 2.6 : Défrichement et épierrement du piémont Nord du massif des Béni Snassen par les paysans marocains (période coloniale)	168
Photo 2.7 : Douars en ruines dans les sections amont et médiane du versant Nord du massif des Béni Snassen orientaux.....	172
Photo 2.8 : Etat actuel des bassins d'accumulation des eaux de sources et du réseau d'irrigation dans le massif des Béni Snassen orientaux.	179
Photo 2.8 : Exemples de l'érosion du sol dans les Béni Snassen orientaux (2009).....	181
Photo 2.10 : Visites touristiques aux deux sites les plus fréquentés dans le massif des Béni Snassen (grotte du Chameau et grotte des Pigeons)	183
Photo 2.11 : Panneaux de sensibilisation et d'indications destinés aux touristes	184
Photo 2.12 : Introduction de constructions modernes dans le massif des Béni Snassen.....	187

PARTIE II

CHAPITRE 3

Photo 3.1 : Types de terrasses rencontrés dans les Béni Snassen.....	220
Photo 3.2 : Composition de l'occupations du sol dans les Béni Snassen (Azrou Ourhil).....	221
Photo 3.3 : Illustration sur le terrain des fractures (pointillés) et karstifications (flèches) des assises calcaires Carixien, Sinémuires et Hettangien.....	229

CHAPITRE 5

Photo 5.1 : Les écoulements stalagmitiques, les parois de l'étage supérieur fortement érodés, témoignent de l'existence d'un régime noyé.....	260
--	-----

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	7
INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
1. PROBLEMATIQUE	11
1.1 LE BASSIN MÉDITERRANÉEN : UNE ZONE CARACTÉRISÉE PAR UNE PENURIE EN EAU CHRONIQUE	11
1.2 LA RÉGION ORIENTALE DU MAROC : SITUATION ACTUELLE DES RESSOURCES EN EAU	13
1.3 LE MASSIF DES BÉNI SNASSEN « CHÂTEAU D'EAU » EN MILIEU MÉDITERRANÉEN SEMI- ARIDE.....	17
2. CONCEPTS.....	17
2.1 DÉFINITION DE L'ALÉA DES EAUX KARSTIQUES EN MILIEU MÉDITERRANÉEN SEMI-ARIDE	18
2.2 DÉFINITION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES	18
2.3 DÉFINITION DE L'INFILTRATION ET DE LA RECHARGE	21
3. OBJECTIFS DE LA THÈSE	22
4. METHODES UTILISEES	22
4.1 ACQUISITION DES DONNÉES.....	23
4.2 APPROCHE SYSTÉMIQUE APPLIQUÉE AUX TRAITEMENTS DES DONNÉES.....	23
4.3 CREATION D'UN SIG	26
4.4 MÉTHODE MULTICRITÈRES « <i>PPILK</i> »	26
5. PLAN DE THÈSE.....	28
PARTIE I : ÉLÉMENTS DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES EN MILIEU MÉDITERRANÉEN SEMI ARIDE ».....	29
INTRODUCTION PARTIE I.....	31
CHAPITRE 1 : PARAMÈTRES D'ÉTAT DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES ».....	33
1.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	35
1. LITHOSTRATIGRAPHIE	36
1.1 LES TERRAINS PALÉOZOÏQUES	36
1.2 COUVERTURE MÉSOZOÏQUE	38
1.3 CÉNOZOÏQUE : NÉOGÈNE	43
1.4 QUATERNAIRE.....	44
2. EVOLUTION STRUCTURALE	45
2.1 CYCLE HERCYNIEEN	45
2.2 CYCLE ALPIN	45
3. EVOLUTION MORPHOSTRUCTURALE	47
3.1 ANTICLINAUX.....	47

3.2 SYNCLINAUX	49
3.3 BORDURES DE LA CHAÎNE DES BÉNI SNASSEN.....	50
4. HYDROGÉOLOGIE.....	50
CONCLUSION.....	51
1.2 MORPHOLOGIE KARSTIQUE, FORMES ET FORMATIONS SUPERFICIELLES	53
1. MORPHOLOGIE KARSTIQUE	54
1.1 L'INFILTRATION ET LES FORMES EXOKARSTIQUES	54
1.2 L'INFILTRATION ET LES FORMES ENDOKARSTIQUES	58
1.3 LES GORGES	66
1.4 DÉPÔTS ET FORMATIONS SUPERFICIELLES.....	67
1.5 LES PHÉNOMÈNES DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE.....	73
CONCLUSION.....	74
1.3 PARAMÈTRE « RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE »	75
1. RELIEF	76
2. PENTE.....	78
3. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	80
3.1 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ZEGZEL	80
3.2 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED BENI OUAKLANE	82
4. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES.....	82
5. RÉGIME HYDROLOGIQUE.....	86
5.1 VARIATION INTERANNUELLE	86
5.2 VARIATION MENSUELLE.....	87
5.3 VARIATION JOURNALIÈRE	87
CONCLUSION.....	89
1.4 PARAMÈTRE « CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX ».....	90
1. LA TEMPÉRATURE DE L'EAU.....	91
1.1 LES SOURCES ÉMERGEANTES DANS LES TERRAINS CALCAIRES	93
1.2 LES SOURCES ÉMERGEANT DANS LES TERRAINS BASALTIQUES.....	94
1.3 LES SOURCES ÉMERGEANT DANS LES TERRAINS SCHISTEUX	94
1.4 DISCUSSIONS	95
2. LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES EAUX	95
3.1 PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATIONS GRAPHIQUES DES SOURCES KARSTIQUES.....	97
3.2 PRÉSENTATION DES SOURCES NON KARSTIQUES : BASALTIQUES ET SCHISTEUSES.....	100
4. ÉTAT DE SATURATION	102
5. LA TURBIDITÉ	103

6. DÉBIT DES SOURCES.....	105
6.1 VARIATIONS MENSUELLES : EXEMPLE DE LA SOURCE DE ZEGZEL	105
6.2 VARIATIONS JOURNALIÈRES : EXEMPLE DE LA SOURCE D'AIN AWLOUT	106
CONCLUSION.....	107
CHAPITRE 2: PARAMÈTRES VARIABLES DU SYSTÈME « VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES ».....	109
2.1 PARAMÈTRE « PRÉCIPITATIONS »	111
1. PLUVIOMÉTRIE DE LA RÉGION NORD ORIENTALE DU MAROC.....	111
2. PLUVIOMÉTRIE DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN	112
2.1 EQUIPEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES.....	112
2.2 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES.....	112
2.3 INTENSITÉ PLUVIOMÉTRIQUE	116
3. INDICE STANDARDISÉ DE SÉCHERESSE PLUVIOMÉTRIQUE.....	119
3.1 CALCUL DE L'ISSP	119
3.2 CLASSIFICATION DE L'ISSP	120
CONCLUSION.....	124
2.2 PARAMÈTRE « COUVERTURE PÉDOLOGIQUE ».....	125
1. LES DONNÉES EXISTANTES	126
1.1 LES SOLS RENCONTRÉS SUR SUBSTRATUM SCHISTEUX	126
1.2 LES SOLS REPOSANT SUR SUBSTRATUM BASALTIQUE	129
1.3 LES SOLS REPOSANTS SUR SUBSTRATUM CALCAREO-DOLOMITIQUE	129
1.4 ÉPAISSEUR DE SOLS	134
2. PERMÉABILITÉ DES SOLS.....	136
2.1 TERRAIN	136
2.2 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	138
2.3 SPATIALISATION DE LA PERMÉABILITÉ DU SOL SYNTHÉTISÉ	138
CONCLUSION.....	145
2.3 PARAMÈTRE « VÉGÉTATION ».....	147
1. ÉTUDE DES PEUPELEMENTS.....	148
2. LES FACTEURS DE DESTRUCTION DE LA FORÊT DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN.....	152
2.1 ACTIONS DE L'HOMME.....	152
2.2 ACTIONS DU MILIEU	156
3. ÉVOLUTION DU COUVERT VÉGÉTAL DANS LA ZONE D'ÉTUDE	157
3.1 CRITIQUE DE DONNÉES.....	157
3.2 CARTES COLLECTÉES	158

3.2 ETUDE COMPARATIVE	160
CONCLUSION.....	162
2.4 PARAMÈTRE « ACTIVITÉS ANTHROPIQUES »	163
1. EPOQUE PRÉCOLONIALE	163
1.1 AVANT LA FIN DU XIX SIÈCLE	164
1.2 FIN DU XIX SIÈCLE	165
2. LA PÉRIODE COLONIALE (1912-1956) : PREMIÈRE RUPTURE DE L'ORGANISATION SPATIALE TRADITIONNELLE DU TERRITOIRE.....	166
2.1 LA DESTRUCTION DU SYSTÈME TRIBAL.....	167
2.2 LA DESTRUCTION DU SYSTÈME SOCIO-ÉCONOMIQUE.....	167
3. LA PÉRIODE POST-COLONIALE : MONTAGNE EN CRISE	170
3.1 LES ANNÉES 1960	170
3.2 LES ANNÉES 1970 : UNE PÉRIODE TRANSITOIRE.....	171
3.3 LES ANNÉES 1980 : UNE PÉRIODE DE CRISE	172
4. PÉRIODE RÉCENTE 1990/2010 : MONTAGNE EN MUTATION	175
4.1 DÉCISIONS POLITIQUES.....	175
4.2 SITUATION ÉCONOMIQUE	177
4.3 ANALYSE DÉMOGRAPHIQUE	185
CONCLUSION.....	188
CONCLUSION PARTIE I.....	190
PARTIE II : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX KARSTIQUES	191
INTRODUCTION PARTIE II.....	193
CHAPITRE 3 : CONSTRUCTION DU SIG : SPATIALISATION ET ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT DANS LA VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU KARSTIQUES	195
1. CONSTRUCTION D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	198
1.1 POURQUOI UN SIG ?.....	198
1.2 COMPOSANTES DU SIG DANS LE CADRE DE L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES	199
1.3 MODE DE REPRÉSENTATION DES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES DANS UN SIG	200
2. PARAMÈTRE P « PRÉCIPITATIONS »	201
2.1 CRITÈRE « QUANTITÉ DES PRÉCIPITATIONS »	203
2.2 CRITÈRE « INTENSITÉ PLUVIOMÉTRIQUE ».....	205
2.3 L'OBTENTION DE LA CARTE P « PRÉCIPITATION ».....	207
3. PARAMÈTRE « COUVERTURE PROTECTRICE »	208
3.1 INDICE DE VULNÉRABILITÉ EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	209

3.2 INDICE DE LA VULNÉRABILITÉ EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR	211
3.3 OBTENTION DE LA CARTE P « COUVERTURE PROTECTRICE »	213
4. PARAMÈTRE I « INFILTRATION »	215
4.1 CRITÈRE « GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE »	215
4.2 CRITÈRE « PENTE »	219
4.3 CRITÈRE « OCCUPATION DU SOL »	221
5. PARAMÈTRE L « LITHOLOGIE »	227
5.1 OBTENTION DE LA CARTE L « LITHOLOGIE »	230
6. PARAMÈTRE DÉVELOPPEMENT KARSTIQUE OU KARSTIFICATION	232
CONCLUSION	234
CHAPITRE 4 : ANALYSE SPATIALE DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES. TESTS DES FACTEURS DE PONDÉRATION DES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION SELON LA MÉTHODE « PPILK »	235
1. ELABORATION DES CARTES DE VULNÉRABILITÉ GLOBALE	238
1.1 MÉTHODE DE LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE « PPILK »	238
1.2 CALCUL DU FACTEUR DE PONDÉRATION	238
1.3 TESTS DES FACTEURS DE PONDÉRATION	240
1.4 RECLASSIFICATION DES INDICES DE VULNÉRABILITÉ GLOBALE	240
2. ANALYSE SPATIALE DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE : INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS DES IMPLICATIONS CARTOGRAPHIQUES	241
2.1 COMBINAISONS A	241
2.2 COMBINAISON B	246
3. RÉSULTATS SYNTHÉTIQUES	250
CONCLUSION	252
CHAPITRE 5 : KARST ET TEMPS LONG : UNE RECONSTITUTION PALÉO-GEOGRAPHIQUE DE LA GROTTE DU CHAMEAU	255
1. ETUDE PALÉO-ENVIRONNEMENTALE DE LA GROTTE DU CHAMEAU	257
2. CARTOGRAPHIE MORPHOLOGIQUE SOUTERRAINE : RECONSTITUTIONS PALÉO-ENVIRONNEMENTALES	261
2.1 COUPE AA'	262
2.2 COUPE BB'	263
2.3 COUPE CC'	264
2.4 COUPE DD'	266
2.5 COUPE EE'	267
3. COMPARAISON DE LA COMPOSITION PÉTROGRAPHIQUE DES SABLES : SURFACE/SOUTERRAIN	268
4. SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATIONS	268

4.1 A L'ÉCHELLE DES CONDUITS KARSTIQUES	268
4.2 A L'ÉCHELLE DE LA GROTTE DU CHAMEAU	270
CONCLUSION.....	272
CHAPITRE 6 : ANALYSE TEMPORELLE (TEMPS COURT) DE LA VULNÉRABILITÉ GLOBALE DES RESSOURCES EN EAUX KARSTIQUES	273
1. APPROCHE DIACHRONIQUE DE LA VULNÉRABILITÉ	275
2. MÉTHODE.....	275
3. EVALUATION DU MILIEU	276
3.1 PRÉCIPITATIONS	277
3.2 OCCUPATION DU SOL (COUVERT VÉGÉTAL ET ACTIVITÉS ANTHROPIQUES)	277
4 IMPLICATIONS CARTOGRAPHIQUES.....	279
4.1 PRÉCIPITATIONS	279
4.2 OCCUPATION DU SOL.....	285
5. CARTES DE VULNÉRABILITÉ GLOBALE	293
6. EVOLUTION TEMPORELLE SELON LE PARAMÈTRE PRÉCIPITATION (ANNÉE 2000)	296
CONCLUSION.....	297
CONCLUSION PARTIE II	297
CONCLUSION GÉNÉRALE	303
BIBLIOGRAPHIE	315
ANNEXES	329
ANNEXE 1 : OUVRAGES HYDRAULIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA.....	331
ANNEXE 2 : BILAN RESSOURCES/BESOINS DANS LE BASSIN DE LA MOULOUYA, PROJECTION SUR 2020.....	331
ANNEXE 3 : QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA (2001/2008).....	332
ANNEXE 4 : EVOLUTION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA (2001/2008).....	334
ANNEXE 5 : QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA (2001/2008)....	335
ANNEXE 6 : ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN ORIENTAUX (2008/2009)	336
ANNEXE 7 : LE RAPPORT Mg^{2+}/Ca^{2+} DES PRINCIPALES SOURCES DU MASSIF DES BÉNI SNASSEN ORIENTAUX (2008/2009).....	339
ANNEXE 8 : SYNTHÈSE DE LA BASE DE DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES DES SOLS	340
ANNEXE 9 : FONCTIONS DE PÉDOTRANSFERT (SPAW, ROSETTA, HYPRES ET SOLHYDRO 1.0)..	341
ANNEXE 10 : PROCEDURES D'ANALYSES DES SOLS EN LABORATOIRE	345

ANNEXE 11 : CARTE DES SOLS SELON LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (TEXTURE, MATIÈRE ORGANIQUE, DENSITÉ APPARENTE).....	347
ANNEXE 12 : GRANULOMÉTRIE DE SOLS ÉCHANTILLONNÉS (MASSIF DES BÉNI SNASSEN MAI 2010)	348
ANNEXE 13 : HISTORIQUE DE LA LÉGISLATION FORESTIÈRE AU MAROC.....	349
ANNEXE 14 : MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DE TERRASSES AGRICOLES.....	351
ANNEXE 15 : CARTES DE VULNÉRABILITÉ GLOBALE OBTENUES À PARTIR D'UNE VARIATION DES FACTEURS DE PONDÉRATION (COMBINAISONS A ET B).....	353
ANNEXE 16 : BASES DE DONNÉES CLIMATIQUES.....	363
TABLES.....	365

Résumé :

Le massif des Béni Snassen situé au Nord-Est du Maroc, se présente en un vaste dôme anticlinal essentiellement composé de terrains calcaires mésozoïques reposant sur un socle granito-schisteux paléozoïque. Par sa nature lithologique et par sa karstification ce massif contient des ressources hydrogéologiques d'une grande importance d'un point de vue économique (alimentation en eau, irrigation...) dans une zone en plein développement touristique, agricole et urbain.

Ce travail a permis de mesurer la vulnérabilité des ressources karstiques en eau du massif afin de mettre en place des mesures de protection et de préservation de la ressource et fournir aux acteurs du territoire des outils et un support d'aide à la gestion et l'exploitation durables de cette ressource en eau.

Pour répondre à cette problématique il a été nécessaire de croiser grâce aux « Systèmes d'Information Géographique » des données environnementales, anthropiques et territoriales. Cette approche a permis de spatialiser, croiser, superposer et pondérer les différentes couches d'information selon deux entrées :

- (i) l'entrée environnementale a permis de combiner le contexte géologique, l'évolution géomorphologique, la structuration hydrogéologique et les données bio-pédologique et climatique ;
- (ii) l'entrée anthropique pose les usages actuels et permet de prendre en compte les modes de réponse (en termes d'aménagement, de protection...) pour préserver la qualité de la ressource en eau.

Les activités anthropiques fragilisent le système par la dégradation et la surexploitation des ressources naturelles (défrichement, coupe de bois, incendies, activités agro-pastorales non adaptées, etc.), mais aussi favorisent sa protection par le renforcement du milieu (construction des terrasses agricoles, reboisement, restauration, etc.)

Mots-clés :

Eaux souterraines, vulnérabilité, karst, SIG, Béni Snassen, Maroc.

Abstract :

The Beni Snassen massif located in northeastern Morocco corresponds to a vast anticline dome mainly composed of Mesozoic limestones which overlie a Paleozoic basement constituted of granite and schists. By its lithology and karstification this massif contains water resources of a strong economical and societal importance (water supply, irrigation ...) in an area where tourism, agriculture and towns rapidly develop.

During this study we evaluated the vulnerability of karstic water resources of the massif, in order to adopt measures for the protection and conservation of this heritage and for provide local actors with tools. The project is to help them for the management and sustainable exploitation of this water resource.

To address this question it was necessary to cross environmental, human and territorial data through the GIS (Geographic Information Systems). This approach allows us to spatialize, cross, overlap and weight the different information parameters with two inputs:

- (i) the environmental input combines geological framework, geomorphological evolution, hydrogeological and bio-soil and climate data;
- (ii) the anthropogenic input takes into account the modes of response of the system (in terms of development, protection ...) to preserve the quality of water resources.

Human activities weakens the environmental system by the degradation and overexploitation of natural resources as land clearing, logging, fires, unsuitable agro-pastoral activities, etc... However, they can also favour its protection by strengthening the natural environment (construction of agricultural terraces, reforestation, restoration, etc.).

Key words:

Groundwater, vulnerability, karst, GIS, Beni Snassen Massif, Morocco.